

**SENSOR DE LÍQUIDOS BASADO EN CRISTALES
FONÓNICOS DE CAVIDAD RESONANTE
CON POTENCIALES APLICACIONES BIOMÉDICAS**

SIMÓN VILLA ARANGO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO BIOMÉDICO**

DR. RÓBINSON ALBERTO TORRES VILLA

**COORDINADOR LÍNEA DE BIOINSTRUMENTACIÓN Y
PROCESAMIENTO DE SEÑALES DEL GRUPO GIBEC**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
UNIVERSIDAD CES
INGENIERÍA BIOMÉDICA
ENVIGADO
2014**

DEDICATORIA

A mis padres y mi hermano que me han acompañado y apoyado durante mi carrera y en todos los proyectos que he emprendido en mi vida

A Ana que ha sido durante estos últimos años el complemento perfecto y un impulso para mejorar.

A todos los profesores de la universidad con los que tuve la oportunidad de compartir y que tantas enseñanzas me aportaron, en especial Róbinson quien desde un inicio despertó mi interés en el área de Bioinstrumentación y me sirvió de guía para convertirme en lo que soy hoy.

AGRADECIMIENTOS

A Robinsón y Yeison por su constante apoyo y dirección

A Ralf por permitirme conocer este maravilloso tema de investigación

A Julián y Andrés por su constante ayuda en el laboratorio de metalmecánica

A la Escuela de Ingeniería de Antioquia y a la Universidad CES

A la Universidad Otto-von-Guericke de Magdeburg y al Instituts für Mikro- und Sensorsysteme IMOS.

CONTENIDO

	pág.
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	14
INTRODUCCIÓN.....	16
1. PRELIMINARES.....	18
1.1 Planteamiento del problema	18
1.1.1 Contexto y caracterización del problema	18
1.1.2 Formulación del problema	19
1.1.3 Objetivos del proyecto	19
1.2 Marco de referencia.....	20
1.2.1 Ondas Mecánicas.....	20
1.2.2 Velocidad del sonido	21
1.2.3 Impedancia acústica.....	22
1.2.4 Transmisión y Reflexión de ondas.....	23
1.2.5 Sensores de onda acústica	24
1.2.6 Cristales fonónicos	25
1.2.7 Modo de cavidad	28
1.2.8 Modelo de línea de transmisión	28
2. METODOLOGÍA.....	32

3. DISEÑO DE UN SOFTWARE EN MATLAB® PARA SIMULAR LA REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN EN UNA DIMENSIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS A TRAVÉS DE UNA ESTRUCTURA BASADO EN EL MODELO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	34
3.1 Análisis y definición de los requerimientos.....	34
3.2 Diseño del sistema y del software.....	36
3.3 Codificación.....	38
3.4 Prueba del sistema.....	41
3.5 Discusión de los Resultados.....	42
3.6 Conclusiones y Consideraciones finales.....	44
4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRUCTURA CON PROPIEDADES ACÚSTICAS QUE PERMITA OBSERVAR CAMBIOS EN LA VELOCIDAD DEL SONIDO DE LA SUSTANCIA A ANALIZAR.	45
4.1 Simulaciones iniciales.....	45
4.2 Selección de la aplicación y sustancia a analizar.....	48
4.3 Método de diseño en cascada de cristales fonónicos	49
4.3.1 Análisis de requerimientos.....	49
4.3.2 Diseño de la cavidad	50
4.3.3 Diseño del Band-Gap	52
4.3.4 Integración y pruebas	55
4.4 Diseño en CAD de la estructura	59
4.5 Discusión de los Resultados.....	60
4.6 Conclusiones y Consideraciones finales.....	62
5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICO QUE PERMITA REALIZAR LA ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL ENTREGADA POR UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO UNIDO A LA ESTRUCTURA DISEÑADA EN EL PUNTO ANTERIOR, SU ACONDICIONAMIENTO Y POSTERIOR ENVÍO A UN COMPUTADOR.	63
5.1 Análisis y definición de los requerimientos del sistema.....	63

5.2	Diseño del sistema	64
5.3	Fabricación.....	69
5.4	Pruebas preliminares.....	69
5.5	Discusión de los Resultados.....	69
5.6	Conclusiones y Consideraciones finales.....	72
6.	DISEÑO DE UNA APLICACIÓN QUE PERMITA VISUALIZAR LOS VALORES OBTENIDOS POR EL DISPOSITIVO EN EL COMPUTADOR Y SU POSTERIOR ALMACENAMIENTO.	73
6.1	Análisis y definición de los requerimientos.....	73
6.2	Diseño del sistema y del software.....	75
6.3	Codificación.....	77
6.4	Prueba del sistema.....	78
6.5	Discusión de los Resultados.....	78
6.6	Conclusiones y Consideraciones finales.....	80
7.	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SENSOR CONSTRUIDO.....	81
7.1	Protocolo de medición	81
7.2	Experimentación.....	82
	Prueba n-Propanol.....	82
	Prueba Solución Salina	83
	Prueba n-Propanol vs Etanol	83
	Prueba Leche Comercial	84
7.3	Discusión de los Resultados.....	84
	Prueba n-Propanol.....	84
	Prueba Solución Salina	87
	Prueba n-Propanol vs Etanol	91

Prueba Leche Comercial	93
7.4 Conclusiones y Consideraciones finales.....	94
8. BIBLIOGRAFÍA.....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Transmisión y reflexión de ondas acústicas	23
Figura 2: Onda incidente de manera angular.....	24
Figura 3: Modelo unidimensional de un cristal fonónico.....	25
Figura 4: Cristal fonónico con inclusiones cilíndricas(Hsu, 2013).....	26
Figura 5: Escultura "El órgano" de Eusebio Sempere en Madrid	27
Figura 6: Tipos de incidencia de la onda en cristales fonónicos, (Lucklum, y otros, 2012)	27
Figura 7: Modo de cavidad.....	28
Figura 8: Modelo de línea de transmisión para un cristal fonónico de una dimensión de n-capas de dos materiales con diferentes propiedades acústicas (Lucklum & Li, 2009)	29
Figura 9: Diagrama general del sistema informático de Simulación	37
Figura 10: Diagrama de funciones del software de simulación	37
Figura 11: Mockup de la interfaz de usuario del software de simulación.....	38
Figura 12: Interfaz gráfica de usuario del software de simulación en MatLab	40
Figuras 13a y 13b: Comparación software de simulación diseñado vs resultados del profesor Lucklum. Sobre el eje de las abscisas se muestra la frecuencia en Hz y sobre el eje de las ordenadas el coeficiente de reflexión R.....	43
Figura 14: Simulación incluida en artículo del profesor Lucklum IMECE2014-38222 titulado Cavity Resonance Biomedical Sensor. El eje de la derecha corresponde al analizador de impedancias y el de la izquierda a las simulaciones.....	44
Figura 15: Efecto de la variación de impedancias entre cavidad y liquido confinado, el color azul claro denota un contraste bajo, el azul un contraste medio y el azul oscuro un contraste alto.	46
Figuras 16a y 16b: Efecto de un cambio del 10% en el valor de la densidad en las paredes de la cavidad y el líquido confinado respectivamente. En azul claro se muestra una disminución, en azul el valor original y en azul oscuro un aumento ...	46

Figuras 17a y 17b: Efecto de un cambio de 10% en el valor del espesor de la capa en la cavidad y el líquido confinado respectivamente. En azul claro se muestra una disminución, en azul el valor original y en azul oscuro un aumento.....	47
Figuras18a y 18b: Efecto de un cambio de 10% en el valor de la componente real de la velocidad del sonido en la capa en la cavidad y el líquido confinado respectivamente. En azul claro se muestra una disminución, en azul el valor original y en azul oscuro un aumento.....	48
Figura 19: Simulación cavidad $n=1$	51
Figura 20: Cubeta espectrofotometría de GAB SISTEMÁTICA ANALÍTICA SL	51
Figura 21: Band-Gap 5 capas.....	53
Figura 22: Band-Gap 9 capas.....	54
Figura 23: Band-Gap 15 capas.....	55
Figura 24: Simulación estructura compuesta por la cavidad y dos capas de agua..	56
Figura 25: Simulación estructura compuesta por cavidad y dos capas de agua y vidrio a cada lado	56
Figura 26: Simulación $n=14$ en la capa de analito	57
Figura 27: Simulación $n=28$ en la capa de agua	58
Figura 28: Estructura final diseñada y sus propiedades	58
Figura 29: Simulación estructura final (azul) con cambios de +10m/s (negro) y -10m/s (morado) en la velocidad longitudinal del sonido	59
Figuras 30a y 30b: Vistas de la estructura diseñada en el software Solid Edge®	60
Figura 31: Contenedor fabricado.....	60
Figura 32: Contenedor y estructura de soporte	61
Figura 33: Diagrama de bloques del sistema propuesto por Kankare.....	63
Figura 34: Diagrama de Bloques sistema electrónico	64
Figura 35: Configuración AD835 para la modulación de las señales	66
Figura 36: Demodulación especial con filtrado	67

Figura 37: Generación de las señales con módulos DDS9850 y filtrado	67
Figura 38: Acondicionamiento final de la señal demodulada.....	68
Figura 39: Tarjeta impresa diseñada en el software Altium Designer para el sistema de adquisición de datos	68
Figura 40: Sistema de adquisición de datos fabricado.....	69
Figura 41: Señales generadas por los DDS de Analog Devices AD9850	70
Figura 42: Señal modulada de doble banda con portadora suprimida	70
Figura 43: Señal luego de la demodulación especial.....	71
Figura 44: Señal final DC con información sobre amplitud y fase	71
Figura 45: Diagrama general del sistema informático de adquisición de datos	75
Figura 46: Diagrama de funciones del software de adquisición de datos	75
Figura 47: Mockup de la interfaz gráfica de usuario del software de adquisición de datos.....	76
Figura 48: Interfaz de usuario del software de adquisición de datos en MatLab	77
Figuras 49a y 49b: Datos adquiridos por el software diseñado, izquierda, y por la terminal de Arduino, derecha.	78
Figura 50: Comparación dato a dato de las señales adquiridas con el software diseñado y la terminal de Arduino.....	79
Figura 51: Estructura usada en pruebas preliminares y sus propiedades	82
Figura 52: Resultados pruebas experimentales (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de n-propanol en agua destilada.	85
Figura 53: Resultados pruebas experimentales con transformación exponencial (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de n-propanol en agua destilada.....	86
Figura 54: Linealidad resultados de pruebas de n-propanol en agua.....	87
Figura 55: Resultados pruebas experimentales (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de NaCl en agua destilada.....	88

Figura 56: Resultados pruebas experimentales con transformación exponencial (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de NaCl en agua destilada	89
Figura 57: Comportamiento de los resultados de pruebas de NaCl en agua destilada	90
Figura 58: Prueba etanol vs n-propanol.....	91
Figura 59: Resultados pruebas experimentales (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de propanol (naranja) y etanol (azul) usadas.....	92
Figura 60: Resultados pruebas experimentales (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de diferentes tipos de productos lácteos comerciales usados	94
Figura 61: Simulación leche adulterada con melamina	96

pág.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 : Velocidad del sonido de algunos sólidos comunes (Schaaffs, 1967)	21
Tabla 2 : Velocidad del sonido de algunos líquidos comunes (Schaaffs, 1967)	22
Tabla 3: Equivalencia entre Impedancia Eléctrica e Impedancia Acústica.....	28
Tabla 4: Características de las simulaciones de prueba inicial.....	41
Tabla 5: Propiedades de las capas de la estructura usada en la simulación de comparación del profesor Lucklum	41
Tabla 6: Resultados de la prueba inicial del sistema de simulación	42
Tabla 7: Número de datos adquiridos por prueba y diferencia con original	79
Tabla 8: Soluciones de n-Propanol usadas en pruebas preliminares.....	83
Tabla 9: Propiedades de las soluciones de NaCl en agua destilada usadas.....	83
Tabla 10: Propiedades de las soluciones de etanol y propanol usadas.....	84
Tabla 11: Desplazamiento en frecuencia de picos, Δh, y valles, ΔL, en la prueba de n-propanol realizada.	87
Tabla 12: Desplazamiento en frecuencia de picos, Δh, y valles, ΔL, en la prueba de solución salina realizada.....	89
Tabla 13: Sensibilidad picos y valles de transmisión de la prueba de n-propanol vs etanol con soluciones al 5% de concentración.	93

pág.

RESUMEN

El desarrollo de nuevas tecnologías ha llevado los límites de la ingeniería a nuevos niveles aunque a costos muy elevados. Las tecnologías más prometedoras en el área de la medicina que buscan reducir esos costos son electroquímicas, ópticas y acústicas. Dentro del desarrollo de nuevas tecnologías basadas en las propiedades acústicas de los materiales sobresalen los cristales fonónicos y las estructuras resonantes. En este trabajo se presenta un nuevo sensor basado en cristales fonónicos de cavidad resonante con potenciales aplicaciones biomédicas desde su diseño hasta su evaluación.

En este trabajo no solo se propone el diseño del nuevo sensor sino que se presenta una plataforma completa empezando desde la creación de un software para realizar las simulaciones de las nuevas estructuras, el diseño de una metodología de diseño de sensores basados en cristales fonónicos y estructuras resonantes, la construcción de la estructura con propiedades acústicas necesarias para completar el sensor, el uso de un elemento descartable para facilitar la realización de pruebas con sustancias biológicas o de riesgo medio o alto y finalmente un sistema de generación y adquisición de señales de alta frecuencia basado en una modulación de doble banda con portadora suprimida y una demodulación especial.

El sensor desarrollado permite detectar los cambios que ocurren al variar las propiedades físicas de un líquido contenido en un elemento descartable. Se hicieron pruebas preliminares y los resultados obtenidos están de acuerdo con las simulaciones realizadas en el software de simulación diseñado. Los resultados obtenidos son muy prometedores y abren la puerta a muchas posibilidades como el uso de sensores basados en cristales fonónicos en la medicina para realizar pruebas de laboratorio y pruebas cerca al paciente, diversas aplicaciones en la industria alimenticia para la detección de bacterias y patógenos en sus productos así como el monitoreo de medios de cultivo, mediciones ambientales y análisis de calidad de agua, en la industria automotriz para el análisis de la calidad del combustible y en diversas aplicaciones industriales como la caracterización de materia prima entre otros.

Palabras clave: Cristales fonónicos, biomédica, medicina, elemento descartable, sensor.

ABSTRACT

The development of new technologies has led the limits of engineering to new levels even at very high costs. The most promising technologies in the field of medicine that seek to reduce those costs are electrochemical, optical and acoustic technologies. Within the development of new technologies based on the acoustic properties of materials phononic crystals and resonant structures are highlighted. In this paper, a new sensor based on resonant cavity phononic crystals with potential biomedical applications is presented.

In this paper, not only the design of a new sensor is proposed but a complete platform starting from the creation of a software to perform simulations of new structures, the design of a design methodology of phononic crystal sensors and resonant structures, the construction of a structure with the required acoustic properties for the sensor, the use of a disposable element to facilitate testing on biological substances with medium or high risk and finally a system for the generation and acquisition of high-frequency signals based on a dual-band modulation with suppressed carrier and a special demodulation.

The sensor developed in this work is able to detect the changes that occur when varying the physical properties of a liquid contained in a disposable element. Preliminary tests were made and the results agree with the simulations performed in the simulation software designed. The results obtained are promising and open the door to many possibilities as the use of phononic crystals based sensors for medical laboratory testing and point of care testing, various applications in the food industry for the detection of bacteria and pathogens in food products as well as culture media monitoring, environmental measurement, analysis of water quality, in the automotive industry for the analysis of fuel quality and in various industrial applications such as the characterization of raw materials among others.

Keywords: phononic crystals, biomedics, medicine, disposable element, sensor.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de grado presenta el desarrollo de un nuevo sensor que rompe la barrera de los altos costos y permite a países e instituciones que no cuentan con un presupuesto elevado adquirir un sistema de sensado de líquidos para medir cambios en las propiedades físicas de una sustancia con la ventaja de entregar resultados inmediatos y con poca cantidad de muestra. Las potenciales aplicaciones de este sensor varían desde aplicaciones en el área de la salud para realizar pruebas de laboratorio y pruebas cerca al paciente hasta pruebas en la industria alimentaria o automotriz para la detección de patógenos o el análisis de la calidad del combustible.

El desarrollo de este sensor se llevó a cabo en 5 etapas principales. Antes de poder iniciar cualquier tipo de proyecto es necesario tener una idea, al menos general, de cómo se puede solucionar un problema y qué obstáculos se van a presentar en el camino. En el caso del diseño de un nuevo sensor se debe comenzar con la comprensión del evento físico que se presenta y cómo se va a medir. En el campo de los cristales fonónico y las estructuras resonantes existe un vacío en cuanto a herramientas de simulación rápidas que permitan obtener esta información esencial para emprender un proyecto y es por esto que la primera etapa del proyecto se centró en el desarrollo de dicha herramienta. Como resultado de esta primera etapa se obtuvo un software de simulación de cristales fonónicos con una reducción en la dimensionalidad para permitir la realización de simulaciones en un par de segundos y así facilitar el diseño de nuevas estructuras.

Luego de tener un conocimiento básico del evento físico en el que se va a basar un sensor el paso siguiente es pasar a diseñar un componente que permita facilitar la obtención de información de ese evento y si es posible la maximice. La segunda etapa de este proyecto consistió en el diseño y la construcción de una estructura con propiedades acústicas que facilitara la medición de cambios en la velocidad del sonido de una sustancia contenida en una cavidad. La estructura que se obtuvo como resultado de esta etapa no sólo facilita la obtención de esta información sino que además presenta un elemento descartable haciendo más atractivo su uso en aplicaciones que requieran un grado de desinfección elevado. Otro de los resultados de gran valor de esta etapa fue el diseño de una metodología de diseño de cristales fonónicos y estructuras resonantes que permite facilitar y disminuir la necesidad de tener a un experto en el área para realizar nuevos diseños.

La tercera etapa del proyecto consistió en el diseño de un sistema electrónico que convierte el evento físico que se ve magnificado por la estructura diseñada en una señal eléctrica. En este paso se diseñó un sistema basado en una modulación de doble banda con portadora suprimida y demodulación especial para realizar la obtención de la información de la sustancia contenida en la cavidad de la estructura. El sistema electrónico diseñado es de gran importancia ya que debido a su novedoso diseño permite reducir notablemente los costos del sensor.

Teniendo ya el sistema electrónico se pasó a diseñar un software que permitiera la adquisición de la señal y la presentara en el ordenador para que el usuario que manipule el sensor pueda visualizar la información y posteriormente almacenarla.

Finalmente la quinta y última etapa de este proyecto fue la etapa de experimentación y evaluación del sensor desarrollado. Esta etapa es de gran importancia ya que los resultados de esta etapa permitieron demostrar la utilidad de este novedoso sensor en múltiples aplicaciones y cómo el desarrollo de este trabajo puede potenciar futuros desarrollos.

A continuación se presenta el resultado del trabajo desarrollado en este proyecto. Como primer capítulo se encuentran las etapas preliminares en las cuales se presenta el planteamiento del problema y un marco de referencia. Luego en el segundo capítulo se presenta la metodología de trabajo que se usó haciendo referencia a las etapas del proyecto y una serie de actividades necesarias para su complejión. Los capítulos 3 al 7 presentan cada una de las etapas del proyecto, en cada capítulo se tiene además una sección de resultados y una de conclusiones y consideraciones finales. Finalmente en el capítulo 8 se encuentra la bibliografía utilizada para la realización de este trabajo.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Contexto y caracterización del problema

El desarrollo tecnológico ha llevado la medicina a nuevos niveles, pasando del descubrimiento del electrocardiógrafo en 1903 por Willem Einthoven y el uso de rayos x en los años 30 a modernos centros de atención con equipos de medicina nuclear, trasplantes de órganos, biotecnología e ingeniería de tejidos. Junto con estos avances tecnológicos ha surgido una nueva profesión, la ingeniería biomédica, cuyo mayor potencial es la identificación de problemas y necesidades del sistema de salud y ofrecer soluciones basadas en conocimientos en varios campos del saber para promover la prestación de servicios de alta calidad a precios razonables y así mejorar la eficiencia y eficacia del sistema y mejorar la calidad de vida de las personas. (Bronzino, 2000)

Uno de los temas más importantes en la actualidad es el desarrollo de pruebas cerca al paciente PoCT, point of care testing por sus siglas en inglés. Este concepto no es un concepto nuevo, de hecho se viene trabajando en este tipo de pruebas desde hace ya más de 30 años y un ejemplo de esto es el uso de medidores de glucosa y lactato por medio de tirillas reactivas. (Casis & Bedini, 2002)

Los dispositivos pensados para PoC tienen como objetivo ofrecer pruebas rápidas y confiables a los pacientes ya sea en su casa o en un centro médico para así evitar tener que enviar las muestras a centros especializados y poder tomar decisiones en el momento de la prueba mejorando notablemente la atención a los pacientes. (Gubala, Harris, Ricco, Tan, & Williams, 2011)

Un dato preocupante sobre el avance tecnológico en la medicina es que el costo del acceso a la salud es cada vez mayor y cada vez se hace más difícil para los gobiernos sostener un sistema estable. La tecnología normalmente no sube los precios en otras partes de la economía pero el costo del acceso a la salud sigue aumentando su precio cada vez más, después de realizar los ajustes de inflación, automóviles, computadores, equipos de sonido y equipos electrónicos en general cuestan menos hoy que hace 10 años, pero los exámenes diagnósticos y tratamiento para diferentes enfermedades son mucho más costosos debido a que no solo se han perfeccionado los equipos ya existentes sino que se han creado nuevos, que aunque son mucho mejores cuestan mucho más. (Skinner, 2013)

Según la organización mundial de la salud, OMS, el progreso para alcanzar los objetivos del milenio se ha visto ralentizado por la falta de sistemas de diagnóstico económicos ya que los países con menor poderío económico presentan grandes dificultades para acceder a los crecientes avances tecnológicos que conllevan cada vez costos más elevados. (World Health Organization, 2014)

Avances recientes en tecnologías de sensado biomédicas han traído consigo una serie de nuevos sensores y aplicaciones que podrían convertirse en soluciones confiables y de bajo costo. Este progreso podría traer impactos significativos a la práctica de la medicina así

como a la industria biomédica y las tecnologías más prometedoras para cumplir con este objetivo son electroquímicas, ópticas y acústicas. (Cote, Lec, & Pishko, 2003)

En los últimos años Lucklum y otros han demostrado el uso de nuevas técnicas de sensado basadas en ultrasonido y estructuras resonantes como sensores teniendo resultados muy satisfactorios. Lucklum propone un sistema de sensado en el que se usan cantidades muy pequeñas de analito y a través de ultrasonido se detectan cambios físicos y químicos de la sustancia analizada. (Lucklum & Li, 2009) (Lucklum, Li, & Zubstov, 2010) (Lucklum, et al , 2012)

1.1.2 Formulación del problema

El creciente desarrollo tecnológico y la creciente demanda en salud hacen que sea necesario el desarrollo de nuevos instrumentos y sistemas de pruebas cerca al paciente basados en nuevas técnicas de sensado como las estructuras resonantes y los cristales fonónicos, que sean rápidos, accesibles económicamente y de fácil manejo y que puedan ser implementados en los países en los que el costo de los equipos médicos está sobrepasando la capacidad económica del sistema de salud.

1.1.3 Objetivos del proyecto

○ Objetivo General

Diseñar y construir un sensor de líquidos basado en cristales fonónicos de cavidad resonante con potenciales aplicaciones biomédicas

○ Objetivos Específicos

- Programar un algoritmo para simular la reflexión y transmisión de ondas acústicas en una dimensión a través de una estructura basado en el modelo de línea de transmisión.
- Diseñar y construir una estructura con propiedades acústicas que permita observar cambios en la velocidad del sonido de la sustancia a analizar.
- Implementar un sistema de instrumentación electrónico que permita realizar la adquisición de la señal entregada por un transductor ultrasónico unido a la estructura diseñada, su acondicionamiento y posterior envío a un computador.
- Programar una aplicación que permita visualizar los valores obtenidos por el dispositivo en el computador y su posterior almacenamiento.
- Evaluar el desempeño del sensor construido por medio de pruebas en un ambiente controlado.

1.2 MARCO DE REFERENCIA

1.2.1 Ondas Mecánicas

Una onda mecánica es una perturbación que se propaga sobre un medio con un movimiento uniforme. La rapidez de propagación de la onda en el medio está relacionada con las propiedades físicas del mismo. Las ondas mecánicas a diferencia de las ondas electromagnéticas no pueden propagarse en el vacío. Las ondas que se propagan en un medio gaseoso o líquido son llamadas ondas acústicas y las ondas que se propagan en sólidos son llamadas ondas elásticas.

La propagación de las perturbaciones en líquidos y gases se da por medio de ondas de tipo longitudinal mientras que en los sólidos hay propagación de ondas tanto longitudinales como transversales o de cizalladura. Es importante resaltar que existe propagación de ondas transversales en la superficie de los líquidos más no a través de los mismos.

Las partículas en los sólidos no pueden realizar movimientos independientes debido a las fuertes uniones entre átomos, cuando un átomo es excitado por una fuente externa y se desplaza de su posición de equilibrio éste genera una fuerza que hace que sus vecinos se muevan y los vecinos de éstos y así sucesivamente creando fonones. En general un fonón es una excitación colectiva y periódica de un arreglo de átomos en una estructura sólida.

Es importante resaltar que las ondas transmiten una perturbación o vibración y la energía asociada a esta a través de un medio y que en ningún momento hay transporte de materia.

Las ondas son caracterizadas por una serie de magnitudes físicas, la frecuencia, f , determina el número de oscilaciones que se presentan por segundo y la velocidad angular, ω , representa el ángulo girado por unidad de tiempo.

$$\omega = 2\pi f$$

Las ondas acústicas se pueden clasificar por la frecuencia a la que se propagan, ondas con una frecuencia menor a los 16Hz son llamadas infrasonidos, entre 16 y 20KHz sonidos u ondas audibles y superiores a 20KHz ultrasonidos.

La longitud de onda λ es la distancia que recorre la onda en un ciclo completo de oscilación o periodo, T y para poder realizar su cálculo se necesita conocer la velocidad de la onda, c .

$$\lambda = c T = \frac{c}{f}$$

Otra magnitud importante es el número de onda angular, k , que describe la cantidad de oscilaciones en una unidad de distancia y se usa en numerosas ecuaciones (Hugh D. Young, 2009).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

1.2.2 Velocidad del sonido

La velocidad del sonido varía según las propiedades físicas del medio en que se propaga. La velocidad de propagación del sonido en los sólidos es muy alta, en los líquidos media y en los gases muy baja. La velocidad de las ondas longitudinales es mayor a la de las ondas transversales.

En los sólidos la ecuación para determinar la velocidad del sonido en las ondas longitudinales c_L y en las ondas transversales c_T es diferente y depende de los módulos de elasticidad de Young, E , y de Poisson, ν , y del módulo de rigidez, G , así como de la densidad, ρ , del medio propagador. (Crocker, 1998)

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} ; \quad c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

En la tabla 1 se presenta la velocidad del sonido transversal y longitudinal de algunos sólidos.

MATERIAL	c_L (m/s)	c_T (m/s)
ALUMINIO	6370	3110
PLOMO	2160	700
COBRE	4760	2330
LATÓN	4370	2100
ACERO INOXIDABLE	5980	3300
HIERRO DULCE	5950	3220
POLIESTIRENO	2350	1120

Tabla 1 : Velocidad del sonido de algunos sólidos comunes (Schaaffs, 1967)

Para el cálculo de la velocidad del sonido en líquidos se usa el módulo de compresibilidad del fluido y la densidad del mismo. Sin embargo debido a que para una onda sonora típica los cambios de temperatura y presión en el fluido ocurren tan rápido que el flujo de calor entre elementos es despreciable y se puede usar el módulo de compresión adiabática G_s . (Crocker, 1998)

$$G_s = V \left(\frac{dP}{dV} \right) ; \quad c = \sqrt{\frac{G_s}{\rho}}$$

En la tabla 2 se presenta la velocidad del sonido de algunos Líquidos.

MATERIAL	c (m/s)
AGUA (10° C)	1447
AGUA (20° C)	1482
METANOL (20° C)	1120
ETANOL (20° C)	1160
ACETONA (20° C)	1190
ÁCIDO ACÉTICO (20° C)	1170
GLICEROL (20° C)	1930
PROPANOL (20° C)	1180
ACEITE SILICONADO (20° C)	1300

Tabla 2 : Velocidad del sonido de algunos líquidos comunes (Schaaffs, 1967)

1.2.3 Impedancia acústica

El término impedancia es muy común en la física y se refiere a la relación existente entre una acción periódica y la respuesta que se genera en un sistema físico por esta acción. En el caso de la impedancia acústica se refiere a la relación entre la magnitud de la propagación de ondas acústicas y el medio en que se propagan.

La impedancia acústica específica se define como la razón entre la presión acústica P y la velocidad de las partículas, v , de un medio material.

$$Z = \frac{P}{v}$$

La presión acústica es la desviación del equilibrio de presión que genera una onda acústica y está definida como

$$P = \rho c \omega \xi$$

Donde ρ es la densidad, c es la velocidad longitudinal del sonido en el material, ω es la velocidad angular y ξ es la ecuación de onda.

Debido a que la presión acústica es mayor en las crestas, puntos de máxima amplitud de las ondas, y disminuye en los valles, puntos de mínima amplitud de las ondas, la mejor forma de representarlas en el tiempo es con una función senoidal.

$$P(t) = P_{max} \sin(\omega t)$$

La impedancia acústica específica es dependiente de la onda y del medio de propagación y por ende es dependiente de la frecuencia. Es muy utilizada en cálculos en los que las ondas acústicas son transmitidas de un medio a otro.

A diferencia de la impedancia acústica específica, la impedancia acústica característica no es dependiente de la frecuencia y se define como la velocidad del sonido, c , por la densidad, ρ , del material por el que se propaga la onda. (Crocker, 1998)

$$Z_c = \rho c$$

1.2.4 Transmisión y Reflexión de ondas

Cuando un frente de onda cambia de medio un porcentaje de esta es transmitido y otro es reflejado. La impedancia acústica de los medios juega un papel muy importante y entre más cercano a uno sea el ratio de impedancias de los medios mayor será la transmisión de energía. El factor de transmisión es igual a la intensidad de la onda transmitida, I_2 , sobre la intensidad de la onda incidente, I_1 , mientras que el factor de reflexión es igual a la intensidad de la onda reflejada, I_3 , sobre la intensidad de la onda incidente, I_1 . En la figura 1 se puede observar una ilustración sobre este fenómeno.

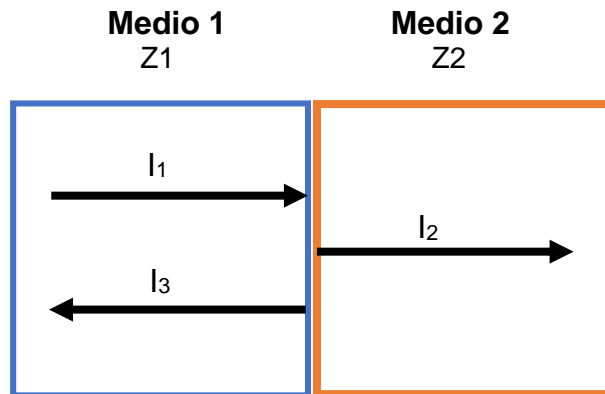


Figura 1: Transmisión y reflexión de ondas acústicas

$$T = \frac{I_2}{I_1} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} ; \quad R = \frac{I_3}{I_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Si los medios se consideran ideales y sin pérdidas se debe cumplir que:

$$1 = R + T$$

En caso de tener una onda incidente que no sea perpendicular se debe tener en cuenta el ángulo de cada una de las ondas para realizar los cálculos de los coeficientes de reflexión y de transmisión. (Hugh D. Young, 2009)

$$T = \frac{2Z_2 \cos \alpha}{Z_2 \cos \alpha + Z_1 \cos \theta} \quad ; \quad R = \frac{Z_2 \cos \alpha - Z_1 \cos \theta}{Z_2 \cos \alpha + Z_1 \cos \theta}$$

En la figura 2 se puede observar un esquema de cómo sería una onda incidente de manera angular.

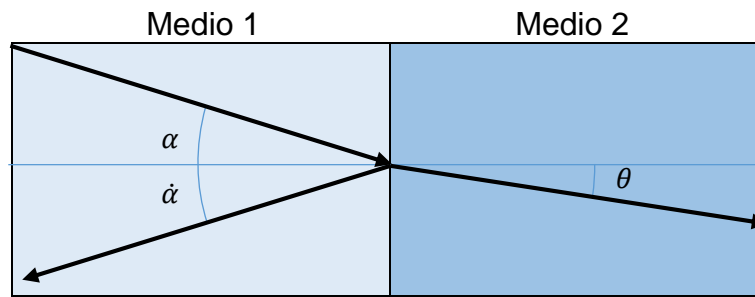


Figura 2: Onda incidente de manera angular

1.2.5 Sensores de onda acústica

El principio básico de operación para un sensor genérico de onda acústica se fundamenta en una onda viajera combinada con una estructura de confinamiento para producir una onda estacionaria cuya frecuencia está determinada por la velocidad de la onda y las dimensiones de la estructura. Es por esto que cualquier cambio en la velocidad de la onda o en la estructura afecta la salida del sensor, adicional a esto también se debe tener en cuenta un nivel de atenuación de la onda viajera.

En el caso de los resonadores de cristal piezoeléctrico la onda viajera puede ser de dos tipos, SAW, Surface acoustic wave por sus siglas en inglés, la cual se propaga en la superficie, o BAW, bulk acoustic wave por sus siglas en inglés, la cual se propaga en el interior.

En el caso de un sólido ideal se pueden presentar 2 tipos de ondas BAW, ondas longitudinales, también llamadas ondas de compresión/extensión, y ondas transversales, también llamadas ondas de cizalladura. Cabe resaltar que las ondas longitudinales tienen una mayor velocidad que las ondas transversales. (Ferrari & Lucklum, 2008)

1.2.6 Cristales fonónicos

Los cristales Fonónicos, PnC, son materiales periódicos compuestos con modulación espacial de la elasticidad, densidad y velocidad transversal y longitudinal del sonido.(Sigalas & Economou, 1992)(Kushwaha, Halevi, Martinez, Dobrzynski, & Djafari-Rouhani, 1993)

En la figura 3 se puede observar un cristal fonónico unidimensional en el cual las dimensiones en los ejes Y y Z son mucho mayores a la dimensión del eje X. En este ejemplo cada capa tiene propiedades acústicas diferentes cumpliendo entonces el principio de modulación espacial.

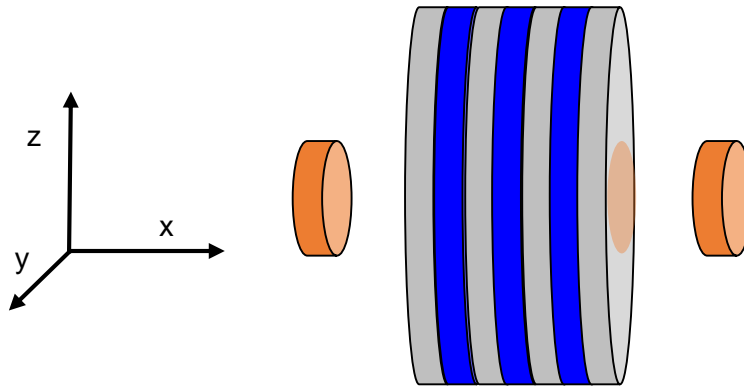


Figura 3: Modelo unidimensional de un cristal fonónico

El cristal fonónico presentado en la figura 3 es un cristal 7 capas y dos tipos de capa. Los tipos de capa están representados por colores, el color azul representa el tipo de capa 1 y el color gris representa el tipo de capa 2. Los discos de color ocre representan un par de transductores ultrasónicos que son usados para emitir ondas de ultrasonido que recorren el cristal y sufren cambios debido a las propiedades acústicas de las capas que componen el cristal.

Un PnC está constituido normalmente por centros de dispersión periódicos con propiedades acústicas diferentes a las de una matriz homogénea que los rodea como se puede observar en la figura 4. Esta configuración permite tener propiedades acústicas antes impensables como bandas de frecuencia rechazadas en las que ciertas frecuencias no se propagan a través de la estructura. El efecto de las bandas prohibidas o bandas rechazadas es similar a un filtro pasa bandas así que se podría hablar de un filtro acústico.(Sigalas & Economou, 1992)(Kushwaha, Halevi, Martinez, Dobrzynski, & Djafari-Rouhani, 1993)

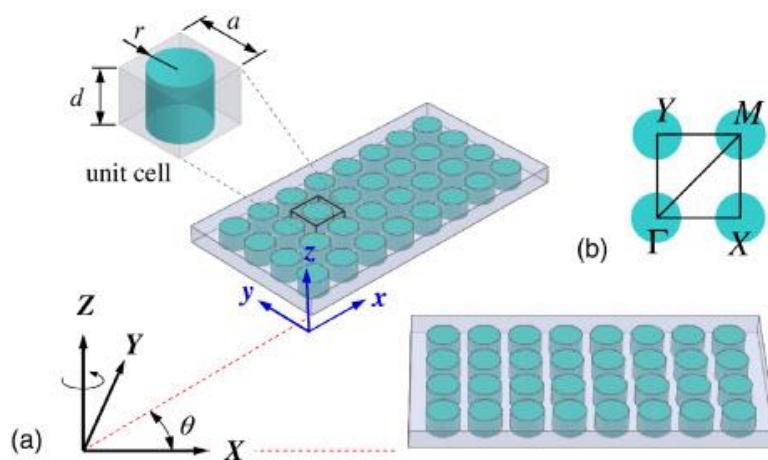


Figura 4: Cristal fonónico con inclusiones cilíndricas(Hsu, 2013)

Las bandas de frecuencia rechazada o Band Gaps aparecen debido a la interacción de las muchas reflexiones y transmisiones que se dan dentro de las múltiples capas que componen a un cristal fonónico. Si la interferencia entre estas reflexiones y transmisiones es destructiva la energía de la onda original es reflejada y la onda no puede propagarse a través del cristal actuando este como un espejo, por otro lado, si la interferencia es constructiva toda la energía de la onda original es transmitida a través de la estructura. Por esto es que la interferencia de las ondas secundarias resulta en la construcción de Band Gaps. La condición necesaria para que se dé este tipo de interferencia es que la diferencia de caminos entre las ondas que interfieren sea igual a un múltiplo entero de su longitud de onda, λ .

Sabiendo que esta diferencia está determinada por la constante de la red del cristal, a , en el caso de los cristales fonónicos de una dimensión el espesor de las capas, y sabiendo también que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda, la frecuencia en el centro del Band Gap, ω_g , es también inversamente proporcional a la constante de la red. (Lucklum & Hauer, Transmission properties of a 1D resonant cavity, 2009) (Lucklum & Li, Phononic crystals for liquid sensor applications, 2009)

$$\omega_g \sim \frac{1}{\lambda} \therefore \omega_g \sim \frac{1}{a}$$

En esta relación es claro que la constante de red es proporcional a la longitud de onda e inversamente proporcional a la frecuencia.

En 1995 unos investigadores del Instituto de Ciencia de los Materiales de Madrid probaron que la escultura de Eusebio Sempere, figura 5, compuesta por cilindros de acero inoxidable, cada uno de casi 3 cm de diametro posicionados en un arreglo cuadrado con separación de 10 cm entre los cilindros, tenía propiedades acústicas. Al realizar un análisis se demostró que la escultura atenuaba fuertemente las ondas acústicas a ciertas frecuencias siendo ésta la primera evidencia experimental de la existencia de bandas de frecuencia prohibidas en estructuras periódicas (Thomas, 2009).



Figura 5: Escultura "El órgano" de Eusebio Sempere en Madrid

Existen 2 orientaciones básicas para exponer un cristal fonónico al ultrasonido, en paralelo o con incidencia normal, figura 6. La incidencia en paralelo es la más usada por los investigadores en la actualidad debido a que se tiene mayor conocimiento y control sobre las interacciones de las ondas en este tipo de estructuras (Lucklum, y otros, 2012).

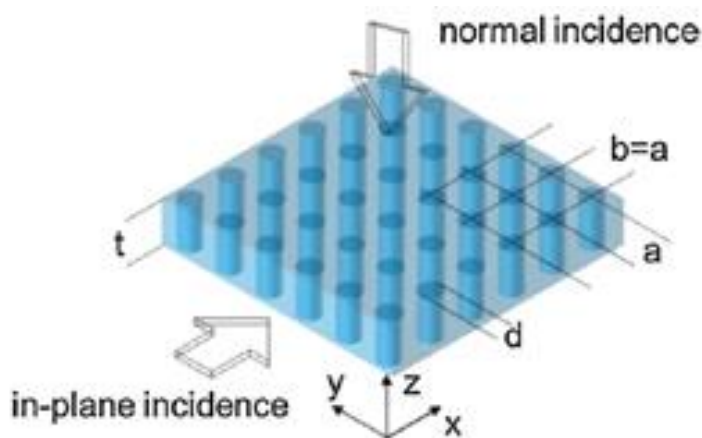


Figura 6: Tipos de incidencia de la onda en cristales fonónicos, (Lucklum, y otros, 2012)

Con frecuencias en el rango de MHz los PnC se pueden construir en dimensiones similares a las de sistemas microfluídicos. Los centros de dispersión se pueden llenar de líquidos y debido a que las bandas de frecuencia rechazadas dependen de las propiedades acústicas de los centros de dispersión cualquier cambio en éstos genera un cambio en la salida del sistema. De esta manera se pueden aprovechar las propiedades de los cristales fonónicos para usarlos como sensores en los cuales la sustancia a analizar pasa a ser parte de la estructura del cristal. (Lucklum & Li, 2009)

1.2.7 Modo de cavidad

Los modos de cavidad, figura 7, en los cristales Fonónicos son usados para mejorar el acople entre capas del PnC, para filtrar señales y en radiación direccional de las ondas. Un modo longitudinal de una cavidad resonante es un patrón particular de onda estacionaria que se presenta por ondas confinadas en una cavidad. Los modos longitudinales corresponden a longitudes de onda que se ven reforzadas por interferencia constructiva de muchas reflexiones de las superficies de la cavidad. Estos modos pueden tener un factor de calidad muy alto y su frecuencia puede ser controlada ajustando las dimensiones de la cavidad de confinamiento. (Lucklum & Hauer, 2009) (Lucklum, Ke, & Zubtsov, 2012)

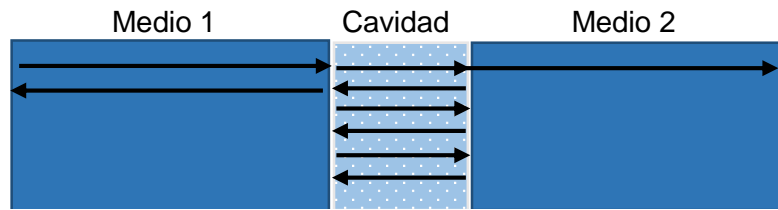


Figura 7: Modo de cavidad

1.2.8 Modelo de línea de transmisión

Existen acercamientos para describir el comportamiento de los sistemas resonantes que hacen uso de circuitos eléctricos equivalentes. El concepto de impedancia en la física es ampliamente usado y en el modelo de línea de transmisión (Lucklum, Behling, Cernosek, & Martin, 1997) se realiza una analogía entre la propagación de ondas acústicas y ondas eléctricas basándose en la similitud del concepto de la impedancia eléctrica y de la impedancia acústica específica. Esta metodología hace que sea más fácil el cálculo de estructuras multicapa al simplificar los cálculos. En la tabla 3 se encuentran las equivalencias entre el modelo eléctrico y el modelo acústico usadas en los diferentes acercamientos que usan circuitos equivalentes.

Tensión Mecánica	$T \Rightarrow U$	Voltaje Eléctrico
Velocidad de Partícula	$v \Rightarrow I$	Corriente Eléctrica
Impedancia Acústica	$Z_a = \frac{T}{v} \Rightarrow Z_e = \frac{U}{I}$	Impedancia Eléctrica

Tabla 3: Equivalencia entre Impedancia Eléctrica e Impedancia Acústica

Dentro de los modelos que se basan en circuitos equivalentes se encuentran dos modelos de línea de transmisión. El modelo de Redwood y el modelo de Krimholtz, Leedom y Mathaei o modelo KLM. Este modelo es el que se va a utilizar de ahora en adelante.

El modelo KLM es un modelo que puede ser usado para realizar la simulación de cristales fonónicos debido a la analogía de impedancias usada y realiza los cálculos en una dimensión haciendo uso de una técnica de cálculo de matrices en cadena. Para que se cumpla la condición de unidimensionalidad es necesario que los diferentes medios por los que se propaga la onda tengan dimensiones laterales mucho mayores al espesor de las capas. Un aspecto importante a considerar en este modelo es que se asume cada capa como homogénea y que las ondas inciden de manera normal sobre las interfaces. En la figura 8 se puede observar un esquema del modelo de línea de transmisión para un cristal fonónico de una dimensión de n-capas de dos materiales con diferentes propiedades acústicas. Las capas 1,3,...n son sólidas y están representadas por layer 1, las capas 2, 4,...n-1 son líquidas y están representadas por layer 2.

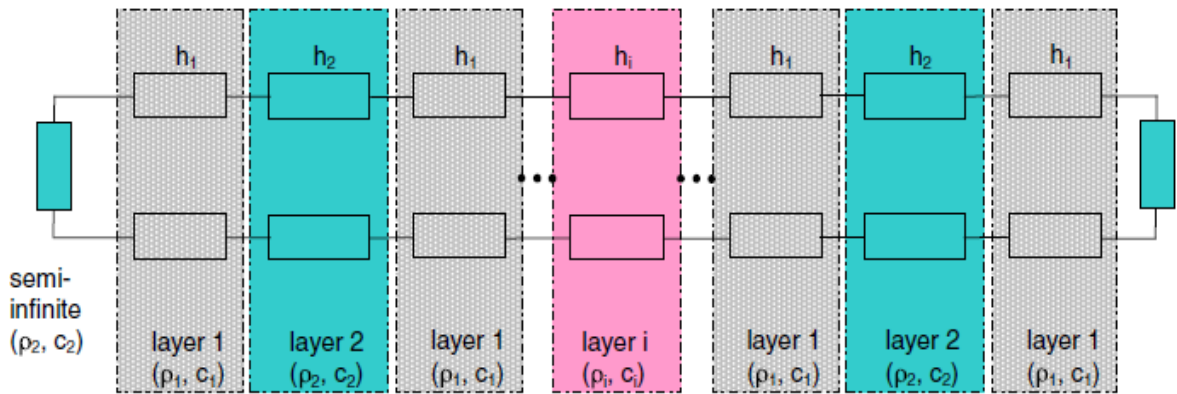


Figura 8: Modelo de línea de transmisión para un cristal fonónico de una dimensión de n-capas de dos materiales con diferentes propiedades acústicas (Lucklum & Li, 2009)

La solución unidimensional presentada fue desarrollada para cristales de cuarzo pero puede ser extrapolada a cualquier otro medio de generación de ondas. Asumiendo dos ondas viajando en direcciones opuestas, la superposición de las mismas debe satisfacer las condiciones de frontera de cada cara del cuarzo así como las de todas las interfaces internas. Teniendo en cuenta la analogía de impedancias realizada se define un voltaje acústico $u_i(z)$ y una corriente acústica $i_i(z)$, donde γ es el coeficiente complejo de propagación de onda, z la coordenada en la que se propaga la onda, k es el número de onda y G el módulo de compresibilidad complejo.

$$u_i(z) = (A_i e^{-\gamma_i z} + B_i e^{\gamma_i z}) e^{j\omega t} \quad ; \quad i_i(z) = \frac{1}{Z_i} (A_i e^{-\gamma_i z} + B_i e^{\gamma_i z}) e^{j\omega t}$$

$$\gamma = jk = j \frac{2\pi}{\lambda} = j \frac{2\pi f}{c} = j \frac{\omega}{\sqrt{(G/\rho)}} \quad ; \quad Z = \rho c = \rho \sqrt{G/\rho} = \sqrt{\rho G}$$

Es importante tener en cuenta que como tanto el módulo de compresibilidad como el coeficiente de propagación son complejos, la impedancia acústica también es un valor complejo.

Los elementos de la matriz de propagación P y de la matriz de transferencia T para cada capa con espesor h son calculados de las propiedades físicas y geométricas de los materiales que la componen.

$$P_i = \begin{bmatrix} e^{-\gamma_i h_i} & 0 \\ 0 & e^{\gamma_i h_i} \end{bmatrix} \quad ; \quad T_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_i} & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Considerando la capa i como un cuadripolo con voltaje de entrada u_i y corriente i_i y voltaje de salida u_{i-1} y corriente i_{i-1} , se puede calcular la transformación con la matriz de transformación M.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{i-1}(z) \\ i_{i-1}(z) \end{bmatrix} &= T_i^{-1} P_i^{-1} T_i \begin{bmatrix} u_i(z + h_i) \\ i_i(z + h_i) \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} u_i(z + h_i) \\ i_i(z + h_i) \end{bmatrix} \\ M_i &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(e^{\gamma_i h_i} + e^{-\gamma_i h_i}) & \frac{Z_i}{2}(e^{\gamma_i h_i} - e^{-\gamma_i h_i}) \\ \frac{1}{2Z_i}(e^{\gamma_i h_i} - e^{-\gamma_i h_i}) & \frac{1}{2}(e^{\gamma_i h_i} + e^{-\gamma_i h_i}) \end{bmatrix} \\ \therefore M_i &= \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_i h_i) & Z_i \sinh(\gamma_i h_i) \\ \frac{1}{Z_i} \sinh(\gamma_i h_i) & \cosh(\gamma_i h_i) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

En general si se tiene un conjunto de n capas y cada capa tiene su propia matriz de transformación entonces las propiedades acústicas combinadas de todas las capas se puede representar como:

$$\begin{bmatrix} u_i(z) \\ i_i(z) \end{bmatrix} = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_n \begin{bmatrix} u_{i+1}(z + h_i) \\ i_{i+1}(z + h_i) \end{bmatrix}$$

Si este conjunto de capas está en contacto con la capa del sensor piezoeléctrico, éste vería el arreglo como una impedancia de carga, la cual se representa como la razón entre el voltaje acústico y la corriente acústica.

$$Z_L = \frac{u_i(z)}{i_i(z)} = \frac{M_{11}Z_t + M_{12}}{M_{21}Z_t + M_{22}}$$

Como se puede observar la impedancia de carga depende del valor de la impedancia en el puerto final $Z_t = \frac{u_n(z)}{i_n(z)}$ y de los elementos $(M_{ij}, i, j = 1..2)$ de la matriz de transformación resultante de la multiplicación de las demás matrices.

$$M_{tot} = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_n$$

En el caso de una sola capa sin carga la impedancia Z_L resultante sería:

$$Z_L = \frac{Z_t + Z_{c1} \tanh(\gamma_1 h_1)}{1 + \frac{Z_t}{Z_{c1}} \tanh(\gamma_1 h_1)} = jZ_{c1} \tan\left(\omega \frac{\rho}{Z_{c1}} h_1\right) = jZ_{c1} \tan(k_1 h_1)$$

Y para una capa con carga la impedancia de carga Z_L resultante sería:

$$Z_L = Z_{c1} \frac{Z_2 + jZ_{c1} \tan\left(\omega \frac{\rho}{Z_{c1}} h_1\right)}{Z_{c1} + jZ_2 \tan\left(\omega \frac{\rho}{Z_{c1}} h_1\right)} = Z_{c1} \frac{Z_2 + jZ_{c1} \tan(k_1 h_1)}{Z_{c1} + jZ_2 \tan(k_2 h_2)}$$

El cálculo de la impedancia de carga se extiende a todas las capas de la estructura formando así el modelo completo y obteniendo los coeficientes de reflexión y transmisión.

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} ; \quad R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

La atenuación o pérdidas que se dan en las diferentes capas están consideradas en la componente imaginaria de Z , específicamente en la componente imaginaria de velocidad del sonido longitudinal. (Lucklum, Soares, & Kanazawa, 2008)

El modelo de línea de transmisión es ideal para realizar el cálculo de la transmisión de ondas acústicas a través de estructuras unidimensionales con múltiples capas dentro de las que se encuentran los cristales fonónicos unidimensionales.

2. METODOLOGÍA

El procedimiento que se utilizó para el diseño y la construcción del sensor está basado en 5 etapas, cada una con una serie de actividades necesarias para la culminación del proyecto. El modelo usado es un modelo en cascada en el que es necesaria la culminación de una etapa para luego continuar con el desarrollo de la siguiente.

Etapas 1: Programación de un algoritmo para simular la reflexión y transmisión en una dimensión de ondas acústicas a través de una estructura, basado en el modelo de línea de transmisión.

- **Actividad 1:** Realización de un diagrama de bloques del software indicando los parámetros que el usuario ingresa y los resultados esperados.
- **Actividad 2:** Escritura del código en un lenguaje de programación apropiado

Etapas 2: Diseño y Construcción de una estructura con propiedades acústicas que permita observar cambios en la velocidad del sonido de la sustancia a analizar.

- **Actividad 1:** Realizar una elección de los materiales de los cuales se compondrá la estructura basándose en sus características acústicas, precio y facilidad de implementación dentro de la estructura.
- **Actividad 2:** Determinar una sustancia a analizar, teniendo en cuenta que esta debe sentar las bases para posibles aplicaciones biomédicas.
- **Actividad 3:** Determinar el tamaño de cada una de las capas de la estructura realizando análisis de impedancia y transmisión de cada uno de los materiales elegidos.
- **Actividad 4:** Realizar un análisis del efecto de usar capas de acople y su influencia en la transmisión de las ondas acústicas en caso de ser necesario.
- **Actividad 5:** Realizar un informe en el que se muestre el comportamiento de la estructura elegida al cambiar la concentración de la sustancia a analizar.
- **Actividad 6:** Diseñar en un software CAD la estructura con propiedades acústicas basada en los resultados de las simulaciones de las actividades anteriores.
- **Actividad 7:** Construir la estructura diseñada en la actividad anterior.

Etapas 3: Diseño y Construcción de un sistema de instrumentación electrónico que permita realizar la adquisición de la señal entregada por un transductor ultrasónico unido a la estructura diseñada en el punto anterior, su acondicionamiento y posterior envío a un computador.

- **Actividad 1:** Se desarrollará un diagrama de bloques para definir los pasos para que la señal sea adquirida, acondicionada y filtrada para después ser enviada al computador.
- **Actividad 2:** Mediante el uso del software de simulación de circuitos se realizará el diseño y la simulación computacional del circuito de adquisición, acondicionamiento y transmisión de la señal entregada por el sensor elegido en la etapa anterior.
- **Actividad 3:** Implementación y pruebas preliminares del circuito diseñado en la actividad anterior.

Etapas 4: Diseño de una aplicación que permita visualizar los valores obtenidos por el dispositivo en el computador y su posterior almacenamiento

- **Actividad 1:** Uso de un lenguaje de programación adecuado para realizar la adquisición de los datos desde el sistema conectado al puerto USB del computador.
- **Actividad 2:** Uso de un lenguaje de programación adecuado para implementar una interfaz gráfica de usuario en la que se visualizarán los datos del sensor elegido en las etapas anteriores.

Etapas 5: Evaluación del desempeño del sensor construido

- **Actividad 1:** Diseño de un protocolo de medición para probar el funcionamiento del sensor.
- **Actividad 2:** Realización de pruebas de funcionamiento con la sustancia elegida en la actividad 2 de la etapa 2 y de acuerdo al protocolo diseñado en la actividad anterior.
- **Actividad 3:** Realización de un informe detallado de las pruebas realizadas en el que se muestre una comparación entre los resultados teóricos obtenidos en el software diseñado y los experimentales.

3. DISEÑO DE UN SOFTWARE EN MATLAB® PARA SIMULAR LA REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN EN UNA DIMENSIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS A TRAVÉS DE UNA ESTRUCTURA BASADO EN EL MODELO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

Para la realización del software de simulación de cristales fonónicos y estructuras resonantes se usó parte de la metodología de diseño de software en cascada propuesta por Winston Royce. Este modelo es un modelo orientado a las actividades y ordena de manera secuencial una serie de actividades necesarias para la complejión del proyecto. (Sommerville, 2005)

3.1 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS

Inicialmente se realizó una lista de requerimientos basada en una entrevista con uno de los mayores expertos en el mundo en cristales fonónicos, el profesor Ralf Lucklum de la universidad Otto-von-Guericke en Magdeburgo Alemania.

El objetivo del software a diseñar es poder observar los coeficientes de transmisión y reflexión obtenidos al hacer pasar una onda ultrasónica a través de una estructura conformada por una serie de capas con propiedades físicas diferentes. El usuario debe poder determinar el rango de frecuencias a analizar así como la resolución frecuencial de la simulación. Debido a que una simulación de una estructura en 2 o 3 dimensiones tiene un costo computacional muy elevado, el profesor Lucklum recomienda realizar un software con un costo computacional bajo y que realice simulaciones rápidamente basado en el modelo de línea de transmisión unidimensional que ya ha sido ampliamente usado por él y con el que se han obtenido buenos resultados. En éste modelo se deben ingresar los parámetros de cada una de las capas a analizar y es fundamental que el usuario pueda elegir el número de capas así como realizar cambios a éstas de manera fácil y rápida. Los parámetros requeridos son la velocidad del sonido, la densidad y el espesor de cada capa que compone la estructura. A partir de estos parámetros se calcula la impedancia característica de la capa y la impedancia de carga o impedancia efectiva acumulada. Teniendo ya estos valores se pasa a realizar el cálculo de la reflexión y de la transmisión a través de la estructura completa. Además de las gráficas de transmisión y reflexión, el profesor Lucklum recomienda la posibilidad de observar gráficas de impedancia, tanto característica en una frecuencia determinada por el usuario como efectiva o de carga en una capa de interés. Finalmente la última recomendación es que el software sea amigable, que el usuario pueda realizar las tareas de manera fácil y rápida y pueda comparar diferentes simulaciones para así hacer más eficaz la búsqueda de nuevas estructuras y así poder diseñar de una forma más eficiente nuevos cristales fonónicos.

Lista de requerimientos:

- **Requerimientos Funcionales:**

- El usuario debe poder ingresar el rango de frecuencias a analizar en un cuadro de texto debidamente referenciado en la interfaz gráfica de usuario.
- El usuario debe poder ingresar la resolución frecuencial deseada en un cuadro de texto debidamente referenciado en la interfaz gráfica de usuario.
- El software debe estar basado en el modelo de línea de transmisión para mantener un gasto computacional bajo al realizar la reducción de la dimensionalidad.
- El usuario debe poder ingresar el número de capas que componen la estructura a analizar en una serie de cuadros de texto debidamente referenciados en la interfaz gráfica de usuario.
- El usuario debe poder modificar los parámetros de cada capa de la estructura por medio de una serie de menús desplegables debidamente referenciados en la interfaz gráfica de usuario.
- Los coeficientes de transmisión y reflexión serán graficados a partir de los datos ingresados por el usuario si se selecciona la opción graficar de una serie de botones debidamente referenciados en la interfaz gráfica de usuario.
- El usuario debe poder acceder a las gráficas de impedancia de cada capa si se selecciona la opción graficar de una serie de botones debidamente referenciados en la interfaz gráfica de usuario.

- **Requerimientos de Desempeño:**

- El software debe realizar el cálculo de los coeficientes de transmisión y reflexión por medio del modelo de línea de transmisión de mil puntos frecuenciales y graficarlos en la interfaz gráfica de usuario en pocos segundos.

- **Requerimientos de Interfaz:**

- El sistema a desarrollar no tiene requerimientos de interfaz ya que no interactúa con otros sistemas informáticos.

- **Requerimientos Operacionales:**

- El modelo de interacción de este sistema informático con el usuario es de interacción clásica. Se basa en el ingreso de datos por medio de un teclado en cuadros de texto y el uso del mouse o puntero para interactuar y realizar selecciones de menús y accionar botones de la interfaz gráfica de usuario.
- Los gráficos de las simulaciones se presentan gráficamente en la interfaz gráfica de usuario.

- **Requerimientos de Recursos:**

- Procesador Intel Core I5 similar o superior.
- 4 GB de memoria RAM.
- 2GB libres de memoria interna.

- **Requerimientos de Seguridad:**

- El sistema a desarrollar no tiene requerimientos de seguridad.

- **Requerimientos de Portabilidad:**

- Sistema operativo Windows 7 de 32 bits similar o superior.
- MatLab® 2012 o superior

3.2 DISEÑO DEL SISTEMA Y DEL SOFTWARE

Diagrama general y diagrama de funciones:

A partir de la lista de requerimientos se continuó con la fase de diseño del sistema y se diseñó un diagrama general, figura 9, en el que se muestra el sistema informático y sus componentes. En el diagrama general se puede observar como en este sistema informático sólo se presenta interacción entre el usuario y un ordenador, en este esquema no hay componentes adicionales como servidores o dispositivos electrónicos adicionales. Adicional al diagrama general se diseñó un diagrama de funciones, figura 10, que muestra la serie de relaciones y transformaciones que sufren los parámetros ingresados por el usuario para finalmente obtener los resultados esperados.

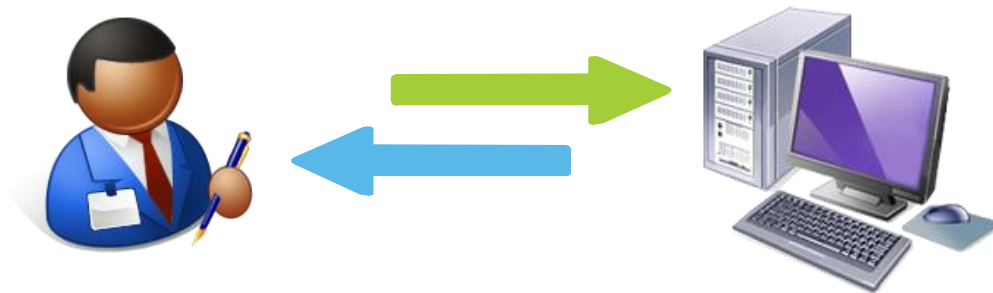


Figura 9: Diagrama general del sistema informático de Simulación

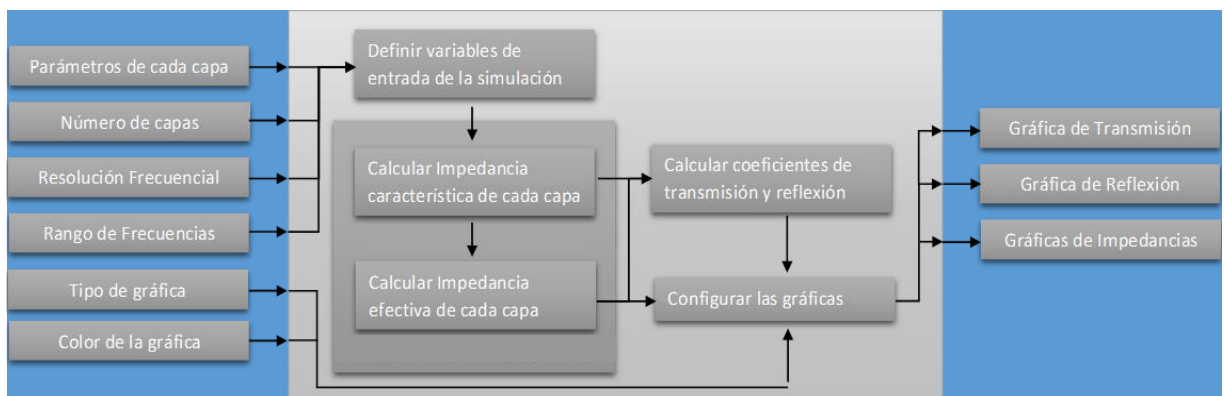


Figura 10: Diagrama de funciones del software de simulación

Inicialmente el usuario debe ingresar los parámetros de la estructura que compondrá el cristal fonónico. Entre los datos a ingresar están el número de capas y sus propiedades, densidad, espesor y velocidad del sonido con su componente real e imaginaria. Además de ingresar estos datos, el usuario también debe especificar el rango de frecuencias en el que quiere que se realicen los cálculos y la resolución frecuencial representada por un periodo o paso frecuencial entre un punto a calcular y el siguiente. Finalmente el usuario debe especificar qué tipo de gráfica desea visualizar, ya sea la transmisión, la reflexión o una gráfica de impedancias.

A partir del ingreso de los datos el programa organiza una serie de matrices en las que define todas las variables de entrada para la simulación y las convierte a las unidades deseadas y genera un vector de frecuencias, luego haciendo uso de la densidad, la velocidad del sonido y el vector de frecuencias generado calcula la impedancia acústica característica de cada capa. Se asume que la capa es homogénea, y con ésta procede a usar las ecuaciones del modelo KLM de línea de transmisión para obtener los valores de la impedancia de carga o impedancia efectiva en cada capa.

Al tener los valores de la impedancia efectiva se procede a hacer el cálculo de los coeficientes de reflexión y transmisión y finalmente dependiendo de la gráfica que el usuario elige se muestran en la pantalla los resultados obtenidos.

Mockup:

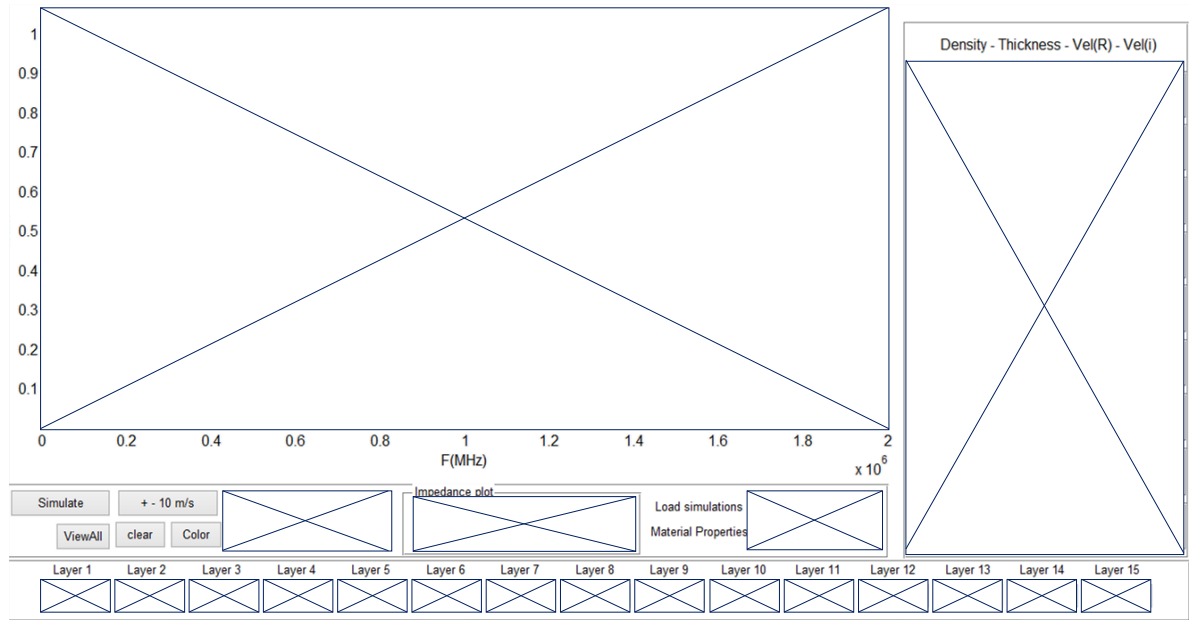


Figura 11: Mockup de la interfaz de usuario del software de simulación

En la figura 11 se puede observar el Mock-up de la interfaz de usuario. Sobre la derecha se plantea ubicar la información referente a las características de las capas que compondrían la estructura a analizar, en la parte inferior se tiene un espacio reservado para seleccionar las capas a usar, directamente sobre las capas estarían ubicados los botones de configuración de las simulaciones y en el medio un poco hacia la izquierda se ubicaría un eje sobre el cual se realizarían las gráficas que el usuario requiera.

3.3 CODIFICACIÓN

A partir del diagrama de funciones se pasó a escribir el código en Matlab®. A continuación se presenta el desarrollo matemático del modelo usado para la codificación.

Inicialmente se calcula la impedancia acústica de cada capa haciendo uso de las variables densidad, ρ , y velocidad del sonido con sus componentes real, v_r , e imaginaria, v_i , ingresadas previamente por el usuario.

$$Zc = \rho v_r + j \rho v_i$$

Luego se calcula la impedancia de carga resultante entre la primera capa y el transductor.

$$Z_L = Z_c \frac{Z_T + jZ_c \tan\left(\frac{\omega e}{v_r}\right)}{Z_c + jZ_T \tan\left(\frac{\omega e}{v_r}\right)}$$

$\omega = 2\pi f$; $e = \text{espesor de la capa}$; $Z_T = \text{Impedancia del transductor}$

El siguiente paso es calcular el valor de la impedancia de carga de cada una de las capas de la estructura.

$$Z_{L(i)} = Z_{c(i)} \frac{Z_{L(i-1)} + jZ_{c(i)} \tan\left(\frac{\omega e(i)}{v_{r(i)}}\right)}{Z_{c(i)} + jZ_{c(i-1)} \tan\left(\frac{\omega e(i)}{v_{r(i)}}\right)}$$

Finalmente se pasa a calcular el valor de los coeficientes de transmisión y reflexión usando la impedancia de carga acumulada de la estructura y los valores del transductor final.

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} ; \quad R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Interfaz gráfica de usuario

En la figura 12 se puede apreciar la interfaz gráfica de usuario diseñada.

Sobre la derecha se tiene una serie de cuadros de texto para definir las características de hasta 9 tipos de capas diferentes. A cada capa se le debe ingresar la densidad, el espesor y la velocidad del sonido, tanto la componente real como la imaginaria.

En el centro se puede observar un eje para visualizar las gráficas.

En la parte inferior izquierda se tienen 5 botones, "Simulate", con el cual se corre una simulación completa de la estructura y se grafican los datos de reflexión y transmisión, "ViewAll", que sirve para ajustar los ejes de la gráfica para ver todos los datos en pantalla, Clear, que borra el eje, Color, que al ser oprimido carga un menú de selección para que el usuario defina el color a usar en la siguiente gráfica y por último el botón +/-10 m/s, que permite realizar la simulación de 3 estructuras, todas con una diferencia de 10m/s en la componente real de la velocidad del sonido del analito, esto con el fin de visualizar si la estructura simulada tiene posibles aplicaciones en un sistema de sensado.

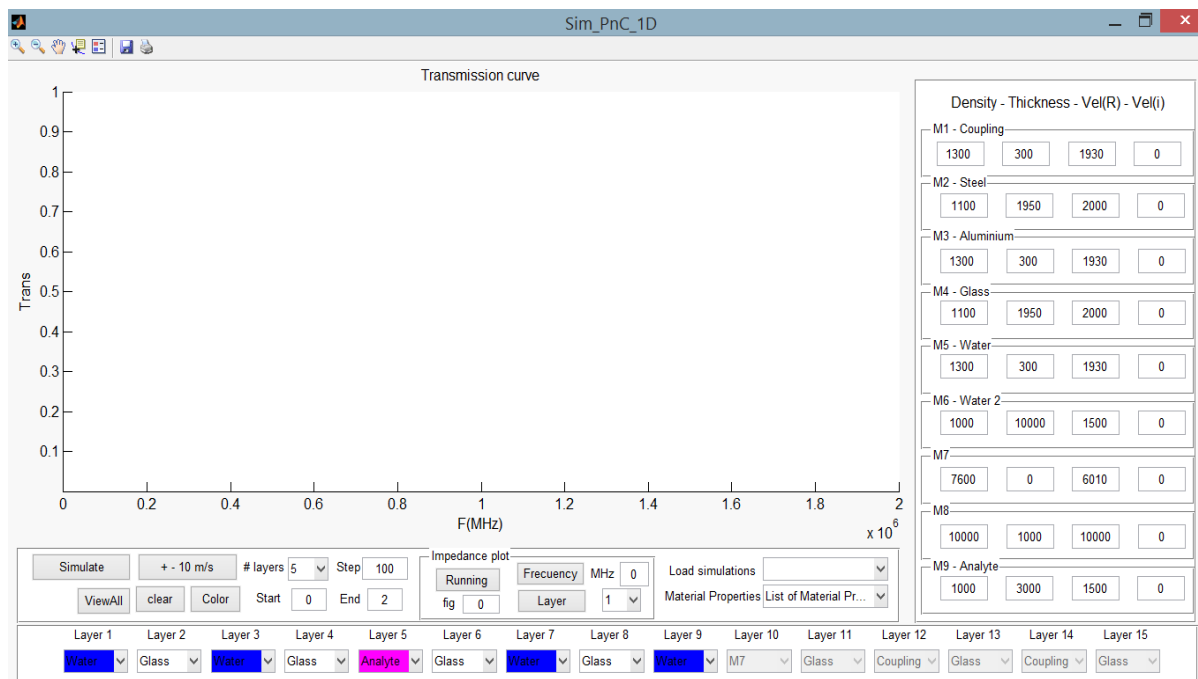


Figura 12: Interfaz gráfica de usuario del software de simulación en MatLab

Sobre la parte inferior se encuentra un recuadro con las opciones para graficar la impedancia, el botón "Running" permite graficar la impedancia de carga de la capa especificada en el menú desplegable de la derecha y a la frecuencia especificada en el cuadro de texto siguiente. El botón "Frequency" permite visualizar una gráfica de la impedancia acústica de cada capa a la frecuencia especificada en el cuadro de texto y por último el botón Layer me permite visualizar la impedancia de la capa especificada en el rango completo de frecuencias.

Sobre la parte inferior derecha se encuentran dos menús desplegables, el primero, Load Simulations, tiene una serie de estructuras predeterminadas que al ser seleccionadas se cargan y sirven para que el usuario las use como punto de partida o referencia a la hora de diseñar una nueva estructura. Bajo este menú se encuentra el menú desplegable Material "Properties", este menú tiene una serie de materiales estándar con sus características y si el usuario selecciona uno de estos materiales, aparecerá un cuadro de dialogo que le pregunta al usuario a que capa quiere exportar este material.

Finalmente en la parte inferior se tiene un arreglo de 15 menús expandibles en los cuales el usuario elije las capas finales que componen la estructura a analizar. En este programa el máximo de capas por estructura es 17, dos transductores y 15 capas intermedias.

3.4 PRUEBA DEL SISTEMA

Luego de finalizar la integración del sistema se pasó a realizar pruebas con éste, para ello se realizaron unas simulaciones de prueba iniciales y se contactó al profesor Lucklum y se le presentó el software para que lo evaluara.

Inicialmente se realizó una prueba para cuantificar cuánto tiempo se toma la herramienta de simulación desarrollada en simular una estructura de 9 capas con dos pasos frecuenciales diferentes. El objetivo de esta prueba inicial es verificar que la implementación del modelo de línea de transmisión efectivamente reduce el tiempo de simulación de estructuras multicapa. Las características de las simulaciones de prueba inicial se presentan en la tabla 4.

	<i># de capas</i>	<i>Rango</i>	<i>Paso</i>	<i># de puntos</i>
<i>Simulación 1</i>	9	0 – 2 MHz	500 Hz	4000
<i>Simulación 2</i>	9	0 – 2 MHz	1 Hz	2000000

Tabla 4: Características de las simulaciones de prueba inicial

La prueba que realizó el profesor Lucklum cuando recibió el software fue comparar una simulación realizada por él con el modelo de línea de transmisión y una realizada con el software diseñado. Es importante resaltar que ambas simulaciones se basan en el mismo modelo matemático pero se realizaron con un software diferente.

La simulación realizada consta de 5 capas. Las propiedades de cada capa se presentan en la tabla 5.

<i># de Capa</i>	<i>Densidad kg/m³</i>	<i>Espesor μm</i>	<i>Velocidad del sonido m/s</i>
<i>Capa 1</i>	1000	inf	1500
<i>Capa 2</i>	3880	1000	4000
<i>Capa 3</i>	1000	750	1500
<i>Capa 4</i>	3880	1000	4000
<i>Capa 5</i>	1000	inf	1500

Tabla 5: Propiedades de las capas de la estructura usada en la simulación de comparación del profesor Lucklum

Los resultados de la simulación se encuentran más adelante.

3.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la tabla 6 se pueden observar los resultados de la prueba inicial para evaluar el tiempo que se toma el software en realizar una simulación.

	# de puntos	Tiempo total (ms)	Tiempo por punto(μ s)
Simulación 1	4000	281.2	70.3
Simulación 2	2000000	49140.6	24.6

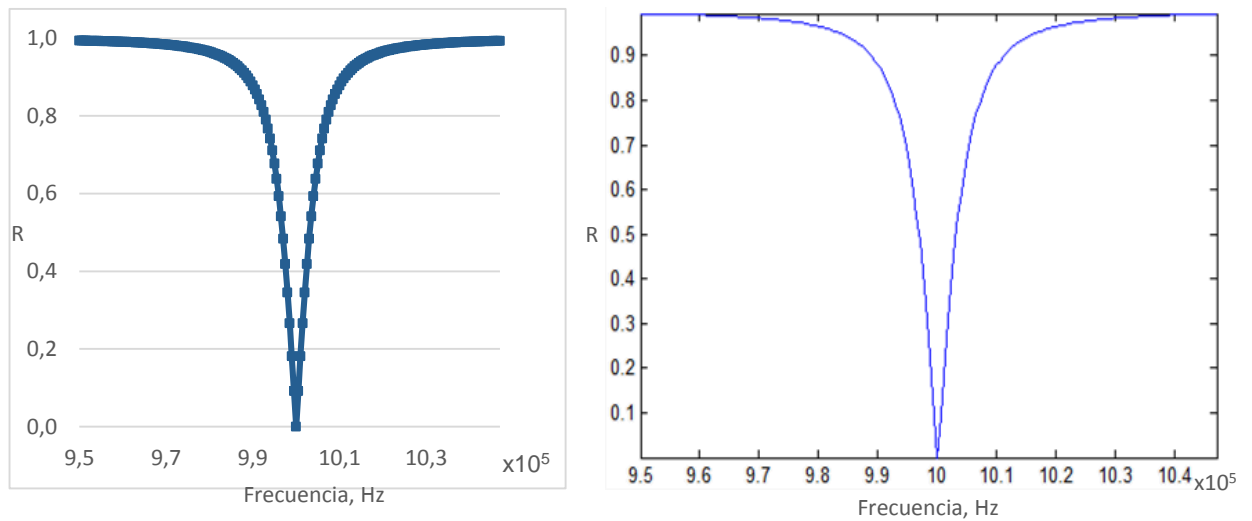
Tabla 6: Resultados de la prueba inicial del sistema de simulación

El software se tomó un tiempo de 281.2ms para realizar la simulación de prueba con 4000 puntos, con un tiempo de 70.3 μ s por punto mientras que para la simulación de prueba con 2000000 de puntos se tomó un tiempo de 49.1s y un tiempo por punto de 24.6 μ s. Estos resultados demuestran que la implementación del modelo de línea de transmisión en el software reduce notablemente los tiempos de simulación de estructuras multicapa haciendo una reducción de la dimensionalidad. Es importante recordar que este tipo de simulaciones con el software diseñado pierden validez si se tiene una estructura que no se asemeja al modelo unidimensional.

Vale la pena mencionar que al realizar la simulación con mayor cantidad de puntos el sistema aumenta su eficiencia reduciendo el tiempo por punto. Esto se puede deber a que el programa se toma un tiempo en establecer una serie de variables y generar los vectores y matrices con los que realiza los cálculos.

El profesor Lucklum realizó la evaluación del software de simulación de cristales fonónicos y encontró que cumplía los objetivos para los que fue diseñado.

En la figura 13a se puede observar la simulación realizada por el profesor Lucklum y en la figura 13b la realizada en el software de simulación.



Figuras 13a y 13b: Comparación software de simulación diseñado vs resultados del profesor Lucklum. Sobre el eje de las abscisas se muestra la frecuencia en Hz y sobre el eje de las ordenadas el coeficiente de reflexión R.

Como se puede ver en las figuras 13a y 13b el resultado de la simulación es el mismo, el profesor Lucklum no sólo realizó esta simulación para comparar los resultados obtenidos sino que realizó muchas más antes de concluir que efectivamente se obtenían los mismos resultados y que el software entregaba datos de simulación correctos.

La figura 13 es solo una de varias simulaciones que realizó el profesor Lucklum para verificar el funcionamiento del software.

En la figura 14 se puede observar una de las gráficas incluidas en uno de los más recientes artículos sobre cristales fonónicos en los que participa el doctor Lucklum y en el que se hace uso del software diseñado en este trabajo. En esta figura se compara la respuesta de un capilar de vidrio con etanol al 100% y un capilar de vidrio con agua destilada. Las líneas punteadas representan los resultados de las simulaciones y las líneas sólidas representan los resultados de la experimentación. Las líneas de color azul oscuro corresponden al agua destilada y las de color azul claro al etanol.

El artículo en el que se incluyó esta gráfica ya fue aprobado y está pendiente de su presentación oral en la ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. El código del artículo es el IMECE2014-38222 y se titula Cavity Resonance Biomedical Sensor.

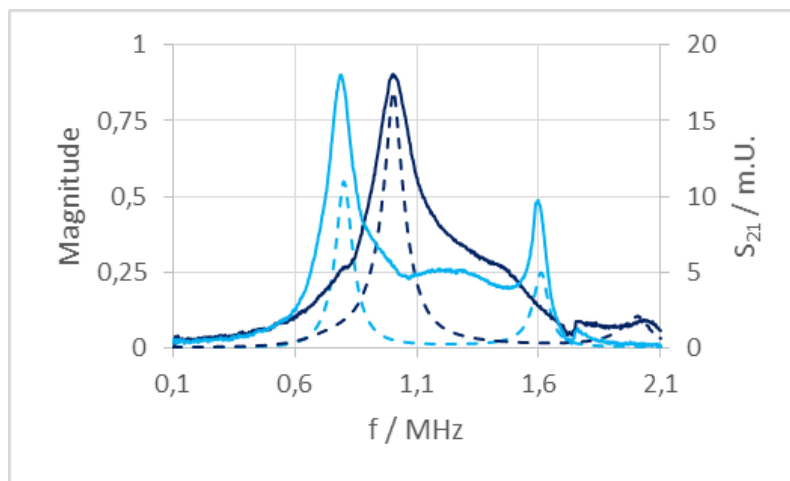


Figura 14: Simulación incluida en artículo del profesor Lucklum IMECE2014-38222 titulado Cavity Resonance Biomedical Sensor. El eje de la derecha corresponde al analizador de impedancias y el de la izquierda a las simulaciones.

3.6 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

El hecho de haber realizado una recopilación de información de alta calidad como lo fue la entrevista con el profesor Lucklum y haber basado el desarrollo del software en una teoría ampliamente revisada como la línea de transmisión permitió que estuviera enfocado en solucionar las necesidades presentes en el área de simulación de cristales fonónicos.

El uso del modelo de línea de transmisión permitió una reducción enorme en la cantidad de recursos computacionales para realizarla y como consecuencia una reducción en el tiempo de simulación de varios días a unos cuantos segundos ya que el uso de otros métodos de simulación basados en modelos 2D y 3D como el LMST (Layer Multiple Scattering Theory) y el FDTD (Finite Difference Time Domain) tienen un costo computacional mucho más elevado. (Y. Tanaka, 2000) (Qiu, Liu, Mei, & Ke, 2005)

Cabe resaltar que la posibilidad de manipular las propiedades de las capas y el diseño de la estructura que se requiere analizar agiliza en gran manera el proceso de diseño de nuevos cristales y que la reducción del tiempo de simulación trae consigo una reducción en los costos de diseño de nuevas estructuras.

El software diseñado es una herramienta que facilita el diseño de nuevas estructuras y nuevos cristales fonónicos que pueden ser usados como sensores en diversas aplicaciones. La característica más importante del software diseñado es la velocidad con la que se pueden realizar las simulaciones debido a la reducción de la dimensionalidad. Pasar de esperar días y necesitar un equipo con altas prestaciones con modelos como a pocos segundos y un equipo de escritorio sencillo para obtener el resultado de una simulación permite realizar numerosas simulaciones y así comprender de una mejor manera el funcionamiento de una estructura antes de fabricarla o pasar a realizar una simulación compleja en 3 dimensiones.

4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRUCTURA CON PROPIEDADES ACÚSTICAS QUE PERMITA OBSERVAR CAMBIOS EN LA VELOCIDAD DEL SONIDO DE LA SUSTANCIA A ANALIZAR.

La correcta elección de cada capa que compone un cristal fonónico (PnC) es muy importante para obtener una banda rechazada bien definida. El cristal que se quiere desarrollar en este trabajo esta basado en una cavidad resonante rodeada de capas elegidas de tal manera que se genere una banda rechazada y dentro de esta una resonancia debida a la cavidad. Teniendo en cuenta que el objetivo de este proyecto es desarrollar una tecnología de bajo costo y fácil implementación y con una amplia cobertura en el ambito de la medicina, es muy importante que los materiales no sean de alto costo y que sean aceptados para ser usados en la medicina.

4.1 SIMULACIONES INICIALES

Antes de comenzar con el diseño de la estructura que compone el cristal fonónico se realizaron una serie de pruebas con el software para observar el efecto que tienen las propiedades de las capas en la respuesta en frecuencia del sistema y en las resonancias principales que se generan por la cavidad y el resto de la estructura del PnC.

La cavidad es la parte más importante del cristal fonónico, debido a que es la que proporciona la resonancia principal sobre la que se basa la medición. Dentro de la cavidad se genera una onda estacionaria que se ve reflejada como una serie de picos de transmisión que se repiten en el espectro de frecuencias con cierta periodicidad. Las dimensiones de la cavidad y las propiedades, tanto del material del que está hecha como del líquido que ésta contiene, definen la posición de los picos en el espectro de frecuencias y su ancho de banda. A continuación se presentan unas gráficas basadas en simulaciones realizadas en la herramienta de simulación de cristales Fonónicos desarrollada en la etapa 1. En éstas gráficas se muestra cómo influencia la elección de diferentes características el comportamiento de los picos de resonancia en el espectro de frecuencias.

Las simulaciones se realizaron asumiendo una capa de agua semi-infinita a cada lado de la cavidad y con un valor de 0 en la componente imaginaria de la velocidad del sonido asumiendo que no hay atenuación. La cavidad está compuesta por un material desconocido al igual que el líquido contenido en ella.

El espectro de frecuencias se centró en un pico de transmisión debido a la concentración de energía en la cavidad simulada. Para poder definir una estructura adecuada primero se debe comprender el efecto que tiene variar cualquiera de los parámetros de la simulación en el pico de resonancia a analizar.

Inicialmente se analizó el efecto de variar la diferencia entre la impedancia acústica de las paredes de la cavidad y la del líquido confinado en ella. En la figura 15 se puede ver el resultado de las simulaciones. En el eje de las abscisas se presenta el coeficiente de transmisión, T .

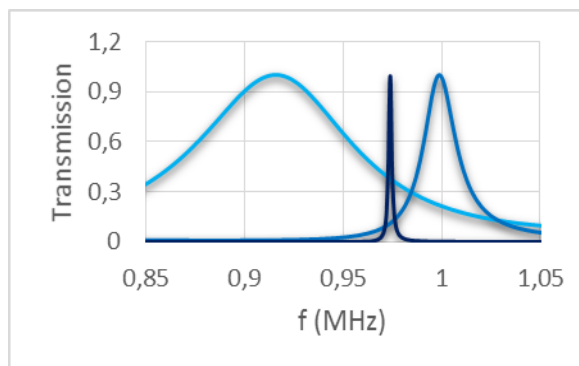
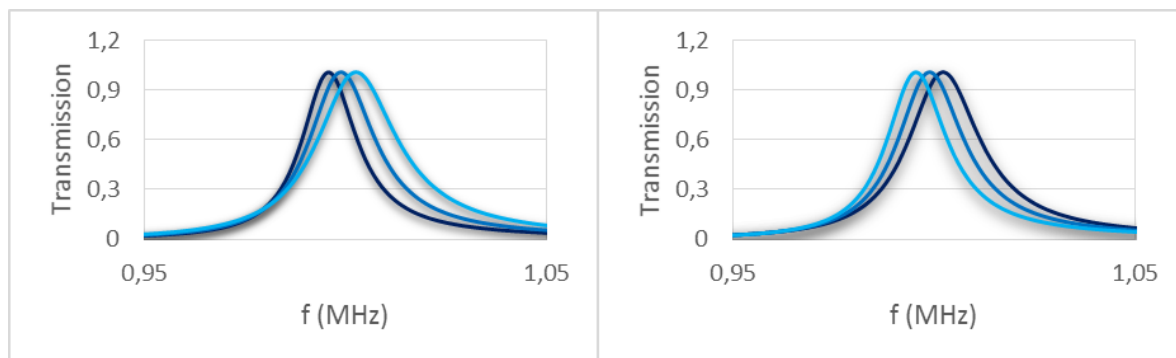


Figura 15: Efecto de la variación de impedancias entre cavidad y líquido confinado, el color azul claro denota un contraste bajo, el azul un contraste medio y el azul oscuro un contraste alto.

Como se puede apreciar en la figura 15, entre mayor es la diferencia de impedancias entre las capas, menor es el ancho de banda del pico resultante y mejor es el factor de calidad del sensor.

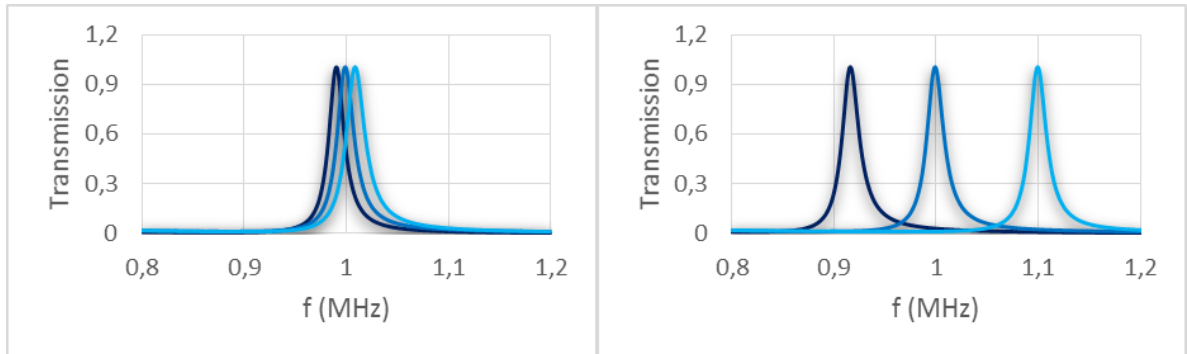
La impedancia acústica depende de la velocidad del sonido y de la densidad del material por el cual se propaga la onda. En las figuras 16a y 16b se muestran las simulaciones obtenidas al realizar cambios en los valores de la densidad de las capas que componen la cavidad.



Figuras 16a y 16b: Efecto de un cambio del 10% en el valor de la densidad en las paredes de la cavidad y el líquido confinado respectivamente. En azul claro se muestra una disminución, en azul el valor original y en azul oscuro un aumento

Como se puede observar en las figuras 16a y 16b, el cambio en la densidad no afecta la amplitud y afecta muy poco la frecuencia del pico de transmisión. Vale la pena mencionar que el efecto de aumentar o disminuir la densidad en el líquido confinado y en la cavidad es opuesto. Si se aumenta la densidad de las paredes de la cavidad el pico de transmisión se desplaza hacia frecuencias más bajas mientras que si se aumenta la densidad en el líquido confinado el pico de transmisión se desplaza hacia frecuencias más altas.

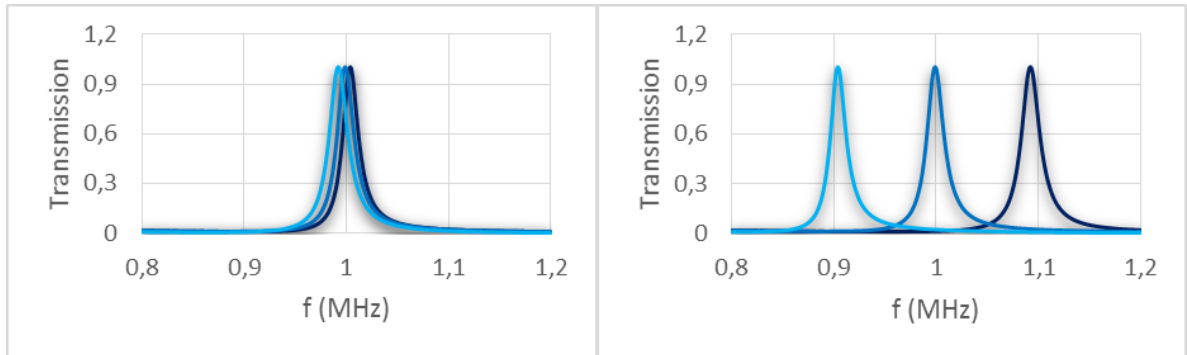
El valor del espesor de las capas es un factor importante al diseñar estructuras resonantes, por esta razón se realizó un análisis del efecto que se produce al cambiar el espesor de las paredes de la cavidad y el espesor del líquido confinado por medio de simulaciones.



Figuras 17a y 17b: Efecto de un cambio de 10% en el valor del espesor de la capa en la cavidad y el líquido confinado respectivamente. En azul claro se muestra una disminución, en azul el valor original y en azul oscuro un aumento.

Como se puede observar en la figura 17a un cambio del 10% en el valor del espesor de las capas que componen las paredes de la cavidad no genera un cambio tan significativo como el observado en la figura 17b, en la que se muestra el efecto de cambiar el valor del espesor de la capa del líquido confinado. Un cambio del 10% en el espesor de la capa de líquido confinado ocasiona un cambio de similar magnitud en el rango de frecuencias.

Habiendo simulado ya el efecto de variar la impedancia acústica, la densidad y el espesor de las capas se pasó a simular el efecto de realizar variaciones en la componente real de la velocidad del sonido. El cambio en la velocidad del sonido es el parámetro de mayor interés ya que el sistema de medición se basa en la detección de estos cambios. En las figuras 18a y 18b se muestran los resultados de las simulaciones.



Figuras 18a y 18b: Efecto de un cambio de 10% en el valor de la componente real de la velocidad del sonido en la capa en la cavidad y el líquido confinado respectivamente. En azul claro se muestra una disminución, en azul el valor original y en azul oscuro un aumento.

Los cambios en la velocidad del sonido de las capas de la cavidad no afectan mayormente la frecuencia de transmisión como se ve en la figura 18a. En la figura 18b se puede observar como cambios del 10% en la velocidad del sonido de la capa de líquido confinado ocasionan cambios de similar proporción en la posición del pico de transmisión en el espectro de frecuencias. El aumentar la componente real de la velocidad longitudinal del sonido se obtiene un desplazamiento hacia la derecha, mientras que al disminuirla se obtiene un desplazamiento hacia la izquierda.

4.2 SELECCIÓN DE LA APLICACIÓN Y SUSTANCIA A ANALIZAR

El desarrollo de un sensor como el que se plantea en este proyecto es muy prometedor ya que abre las puertas a muchas posibilidades como el uso en la medicina para las pruebas de laboratorio y pruebas cerca al paciente, diversas aplicaciones en la industria alimentaria para la detección de bacterias y patógenos así como el monitoreo de medios de cultivo, mediciones ambientales y análisis de calidad de agua, en la industria automotriz en el análisis de la calidad del combustible y en diversas aplicaciones industriales como la caracterización de materia prima, entre otros.

En general debido a que el sensor planteado es para medir cambios de concentración de analito en una muestra líquida, las aplicaciones que se pueden plantear son todas aquellas que involucren fluidos.

Los fluidos biológicos en su mayoría presentan propiedades acústicas similares a las del agua, densidad alrededor de los 1000 kg/m^3 y velocidad longitudinal del sonido alrededor de los 1500 m/s y es por esto que inicialmente se realizará el diseño de una estructura que permita medir cambios en sustancias con propiedades similares a las del agua. Con una estructura como esta no sólo se abarcan aplicaciones en el área de la medicina sino también en la industria alimenticia ya que una gran cantidad de líquidos que se ofrecen poseen estas características. Entre ellos se encuentra la leche y diversas bebidas que se

comercializan en el mercado. Otra de las áreas en las que se hace posible el uso de un sensor diseñado para estas especificaciones es en el análisis de calidad de agua.

4.3 MÉTODO DE DISEÑO EN CASCADA DE CRISTALES FONÓNICOS

Habiendo simulado ya el efecto que tiene cada una de las propiedades de las capas sobre las resonancias en la estructura y teniendo información sobre las potenciales aplicaciones se pasó a diseñar el cristal fonónico.

En este proyecto se propone una metodología en cascada de diseño de cristales fonónicos unidimensionales con cavidad resonante en el que el inicio de la siguiente etapa debe esperar hasta la culminación de la etapa inmediatamente anterior.

Las etapas del modelo son:

- 1- Análisis de requerimientos
- 2- Diseño de la cavidad
- 3- Diseño del Band-Gap
- 4- Integración y pruebas

4.3.1 Análisis de requerimientos

En esta etapa se realiza la recolección de información y se genera una lista de necesidades o requerimientos del PnC a diseñar. Esta recolección de información se puede realizar por medio de entrevistas con quién solicita el desarrollo del PnC o con expertos. Es importante definir qué aplicación tendrá el cristal diseñado y que sustancia o sustancias se desean analizar, también es importante aclarar si se tienen limitaciones en el rango de frecuencias en el que se busca realizar la medición debido a la poca disponibilidad de transductores ultrasónicos en el mercado.

Uno de los objetivos de este trabajo de grado es tener potenciales aplicaciones biomédicas, teniendo en cuenta esto se generó la siguiente lista de requerimientos.

Lista de requerimientos:

- La muestra a analizar es líquida
- La medición se debe poder realizar con poco volumen de muestra.
- La medición debe poder detectar cambios de decenas de metros por segundo en la velocidad longitudinal del sonido de la muestra.
- La muestra debe estar contenida en una cavidad desechable
- La medición se debe realizar alrededor de 1MHz ya que se cuenta con transductores que funcionan a esa frecuencia de resonancia
- Las propiedades acústicas de la muestra son similares a las del agua ya que la mayoría de los fluidos de interés en aplicaciones biomédicas tienen valores muy cercanos a esta.
- El cristal no debe medir más de un par de centímetros ya que se pretende usar en pruebas cerca al paciente y pruebas de campo.

4.3.2 Diseño de la cavidad

Esta etapa es fundamental para el diseño del PnC ya que define la frecuencia a la que se va a trabajar además del volumen de muestra que se necesita para realizar la medición.

Primero se debe definir el material de la cavidad. Como ya se vio en el numeral 3.2.1 el material de la cavidad debe tener una impedancia acústica que contraste con la impedancia del líquido confinado. En este caso el líquido confinado es agua así que el material de la cavidad debe ser un material con alta impedancia acústica. Uno de los puntos de la lista de requerimientos es que se cuente con un sistema para aplicaciones biomédicas y para realizar pruebas cerca al paciente. Teniendo en cuenta el amplio uso que se le ha dado al vidrio en la medicina y las facilidades que este presenta para su esterilización la estructura se compondrá de vidrio. El vidrio no tiene una impedancia tan alta como algunos metales, pero sigue siendo alta si se compara con la de la mayoría de los líquidos.

Habiendo definido ya el material se pasa a calcular las dimensiones de la cavidad.

Primero se define la frecuencia a la que se va a trabajar. Teniendo en cuenta que se cuenta con un par de transductores cerámicos con una frecuencia central alrededor de 1.05 MHz se definió ésta como la frecuencia a la que se va a trabajar.

$$f = 1.05MHz$$

Luego se calcula el espesor de la capa de la muestra teniendo en cuenta que para una capa a con espesor d_a confinada en una cavidad simétrica, se tiene que con $d_T = n\lambda/2$ hay máxima transmisión y que con $d_R = (2n - 1)\lambda/4$ hay máxima reflexión. Siendo n un número entero. (Pain, 2005)(Millner, 1987)

$$d_T = \frac{n\lambda}{2} ; f = \frac{c}{\lambda} \therefore f = \frac{nc}{2d_T} \therefore d_T = \frac{n(1500m/s)}{2(1.05MHz)} = n0.714 mm$$

Ahora se calcula el valor donde la transmisión es mínima.

$$d_R = \frac{(2n - 1)\lambda}{4} ; f = \frac{c}{\lambda} \therefore f = \frac{(2n - 1)c}{4d_R} \therefore f = \frac{(2n - 1)(1500m/s)}{4(0.714mm)} \\ = (2n - 1)525.2Khz$$

Teniendo ya el valor del espesor del líquido confinado se pasa a calcular el espesor de las capas de la cavidad. Para este cálculo se tiene en cuenta que para que se dé un acople de impedancias sin pérdidas se debe cumplir que $d = \lambda/4$ (Pain, 2005)(Millner, 1987).

La velocidad longitudinal del sonido en el vidrio es de 5760 m/s.

$$d_a = \frac{\lambda}{4} ; f = \frac{c}{\lambda} \therefore f = \frac{c}{4d_a} \therefore d_a = \frac{(5760m/s)}{4(1.05MHz)} = 1.371mm$$

En la figura 19 se presenta una gráfica de la respuesta del sistema con $n = 1$.

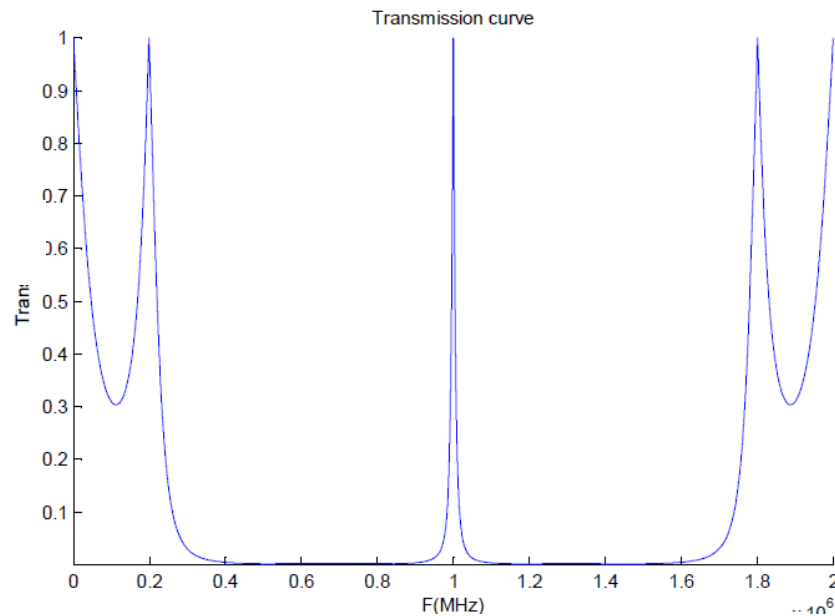


Figura 19: Simulación cavidad $n=1$

Dentro de los requerimientos del sensor se encuentra que debe ser apto para ser usado en pruebas cerca al paciente y pruebas de laboratorio, además de que sea económico y que contenga un elemento desechable. Una forma de dar solución a estos requerimientos es usando elementos comerciales que se adaptan a estas necesidades.

Las cubetas de espectrofotometría cuentan con unas dimensiones que se acoplan perfectamente a las necesidades del sensor y al estar hechas de vidrio óptico otorgan una mejor relación de impedancias favoreciendo la respuesta del sistema. En la figura 20 se presenta una cubeta estándar de espectrofotometría.



Figura 20: Cubeta espectrofotometría de GAB SISTEMÁTICA ANALÍTICA SL

El volumen máximo que pueden albergar es de 3ml y por el lugar principal por el que se propagan las ondas sus dimensiones son de 1mm de espesor de vidrio, luego 1 cm de analito y 1mm de vidrio nuevamente. Si se tiene en cuenta que en cálculos anteriores el espesor ideal de la capa de analito es de 0.714 mm por un factor n , al elegir el valor de n como 14 se obtiene que el espesor de la capa puede ser de 1 cm.

$$d_T = n0.714 \text{ mm} ; n = 14 \therefore d_T = 1 \text{ cm}$$

El vidrio óptico es un vidrio con propiedades físicas diferentes al vidrio común, el vidrio común tiene una velocidad del sonido de alrededor de 5600 m/s y una densidad de alrededor de 2200 kg/m³ mientras que el vidrio óptico tiene una velocidad de alrededor de 4000 m/s y una densidad de alrededor de 3900 kg/m³. Haciendo el cálculo nuevamente para que se dé un acople de impedancias sin pérdidas y que se cumpla que $d = \lambda/4$ se obtiene que el valor ideal de la capa de vidrio es muy cercano a un milímetro.

$$d_a = \frac{(4000 \text{ m/s})}{4(1.05 \text{ MHz})} = 0.952 \text{ mm}$$

4.3.3 Diseño del Band-Gap

La característica más sobresaliente de los cristales fonónicos es la formación de Band-Gaps o bandas de frecuencia en las que las ondas sonoras no se transmiten a través de la estructura. Estas bandas permiten aumentar de manera considerable el factor de calidad de los picos de resonancia que se encuentren dentro del rango de frecuencias adecuado. Para realizar un adecuado diseño del PnC, se debe ubicar el centro del Band-Gap, punto de máxima reflexión, en el pico de transmisión del líquido confinado en la cavidad ya que permite que haya mayor separación entre los límites del Band-Gap y el pico de transmisión que se desea medir.

Los materiales que se eligen para formar parte de la estructura periódica que da forma al Band-Gap deben tener un alto contraste de impedancia acústica para favorecer la reflexión de ondas sonoras.

Teniendo en cuenta que la cavidad se encuentra formada por vidrio óptico y que este es ampliamente aprobado por la comunidad médica y que el líquido contenido en la cavidad es similar al agua el band gap se conformará por capas de vidrio y agua, para mantener una cierta simetría en la estructura, sin afectar esto de manera significativa el resultado.

Para este cálculo se usa la ecuación de mínima transmisión o máxima reflexión usada anteriormente.

Primero se calcula el espesor de la capa de vidrio.

$$d_a = \frac{n\lambda}{4} ; f = \frac{c}{\lambda} \therefore f = \frac{nc}{4d_a} \therefore d_a = \frac{n(4000 \text{ m/s})}{4(1.05 \text{ MHz})} = 0.952 \text{ mm}$$

Luego el de la capa de agua.

$$d_a = \frac{n\lambda}{4} ; f = \frac{c}{\lambda} \therefore f = \frac{nc}{4d_a} \therefore d_a = \frac{n(1500m/s)}{4(1.05MHz)} = n0.357mm$$

Con el software diseñado se realizó la simulación del Band-Gap con diferente número de capas.

En la figura 21 se puede observar la simulación con una estructura compuesta por 5 capas y en la figura 22 una estructura compuesta por 9 capas.

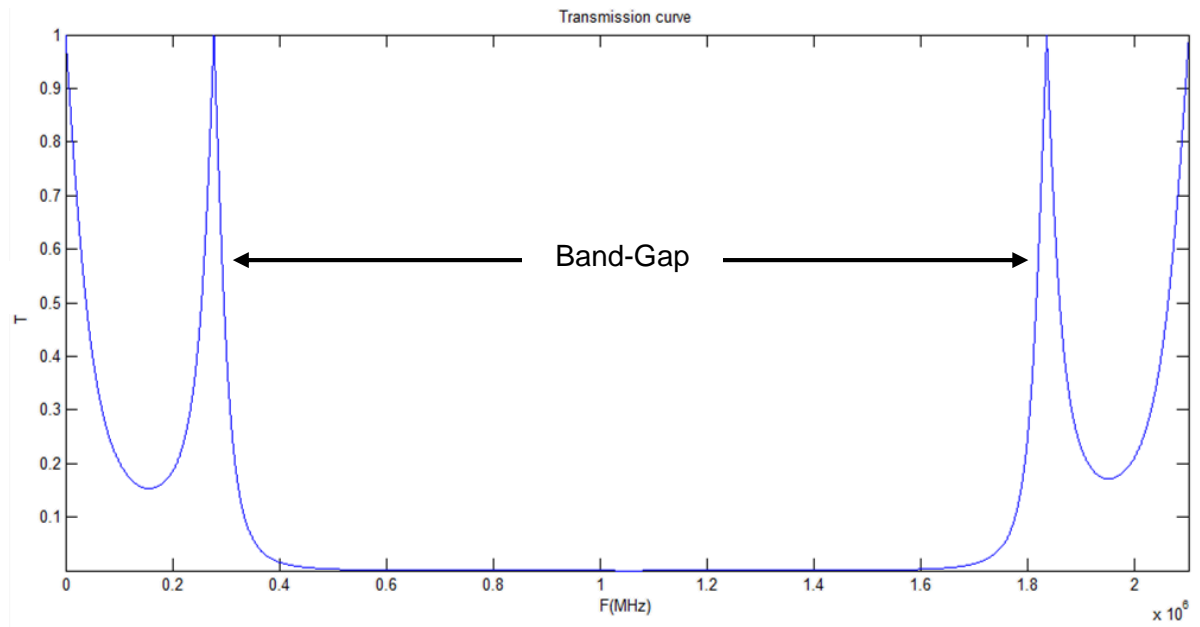


Figura 21: Band-Gap 5 capas

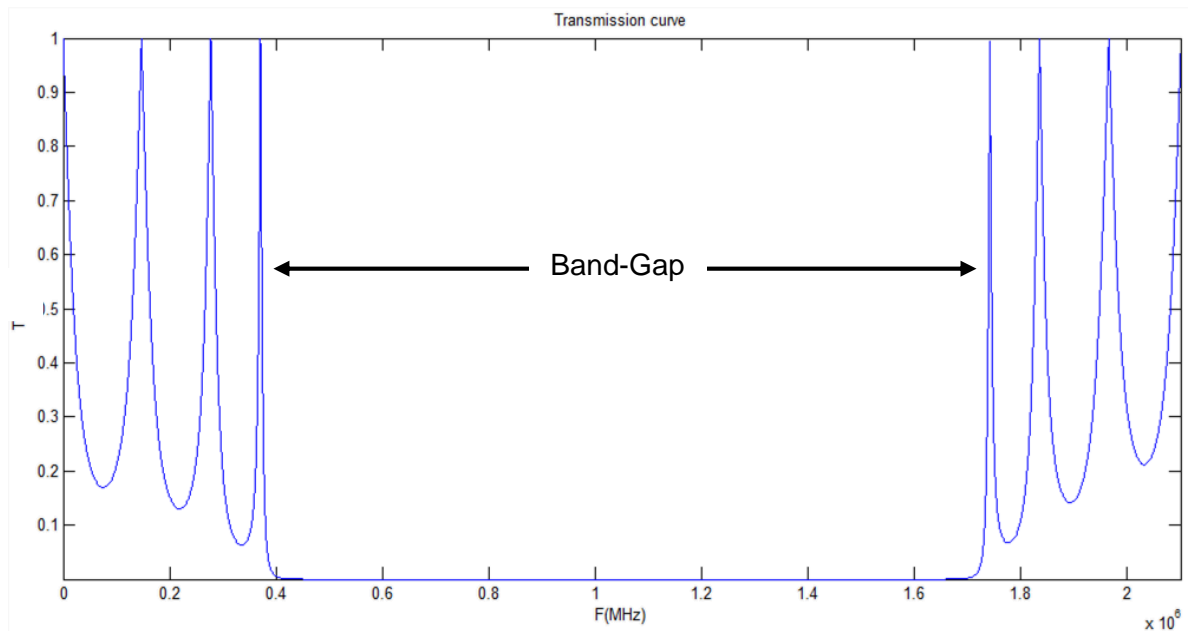


Figura 22: Band-Gap 9 capas

Por medio de estas simulaciones realizadas se puede observar la característica más sobresaliente de los cristales fonónicos, la creación de bandas de frecuencia prohibidas en las cuales las ondas acústicas no se propagan. En las figuras 21 y 22 se puede observar como en el rango de frecuencias comprendido entre 400KHz y 1.7MHz el valor de la transmisión es mínimo corroborando la presencia de una banda prohibida. El comportamiento del sistema de capas que generan la banda rechazada es similar al de un filtro y se puede observar como al aumentar el número de capas también aumenta el orden de este filtro. En la figura 23 se puede observar la simulación de una estructura con las mismas características que las anteriores pero compuesta por 15 capas. En ésta se puede ver como la banda rechazada tiene una forma casi rectangular semeándose más a un filtro ideal.

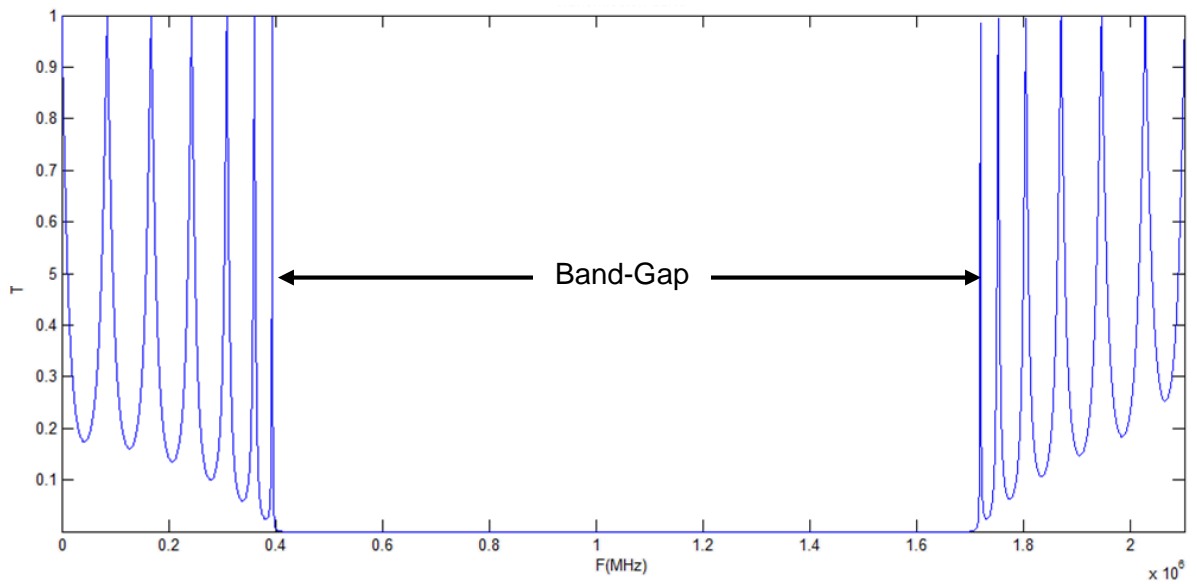


Figura 23: Band-Gap 15 capas

4.3.4 Integración y pruebas

En esta etapa se integra la cavidad diseñada en la etapa 2 con el band-gap diseñado en la etapa 3 y se simula la estructura con los valores ideales y con los valores reales para luego pasar a realizar pruebas de funcionamiento de la estructura diseñada realizando cambios en la velocidad del sonido de la muestra a analizar.

Inicialmente se simuló una estructura compuesta por la cavidad y un par de capas de agua con un valor de $n = 1$ y finalmente los transductores cerámicos. En la figura 24 se pueden observar los resultados de la simulación.

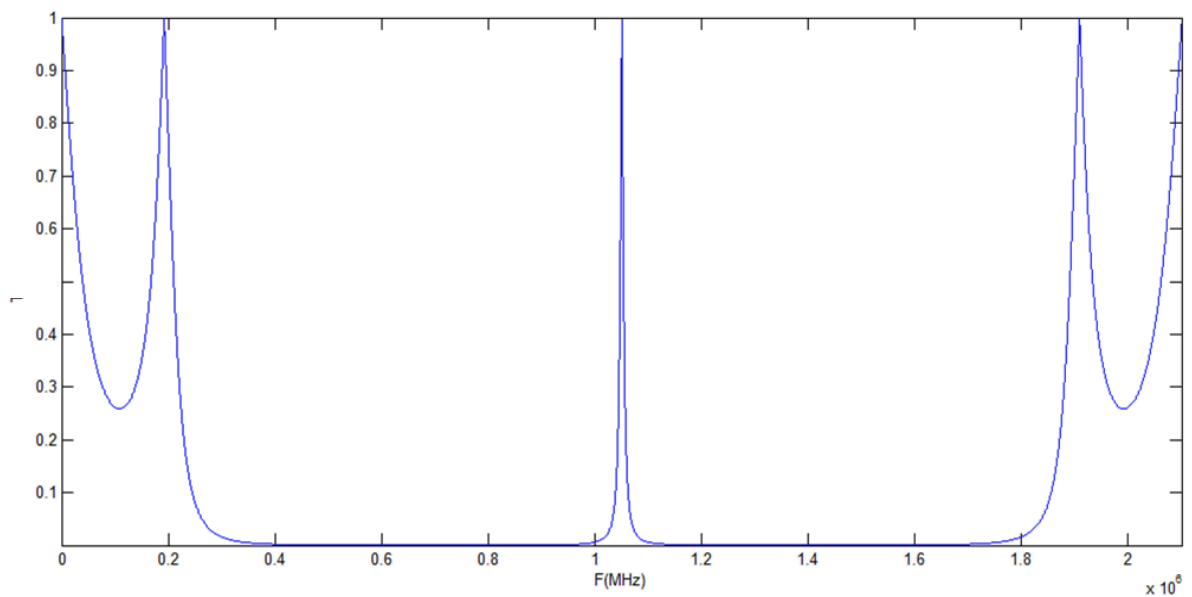


Figura 24: Simulación estructura compuesta por la cavidad y dos capas de agua

Ahora para mejorar la respuesta del sensor se agregan un par de capas de vidrio y agua más de manera simétrica. En la figura 25 se pueden observar los resultados de la simulación.

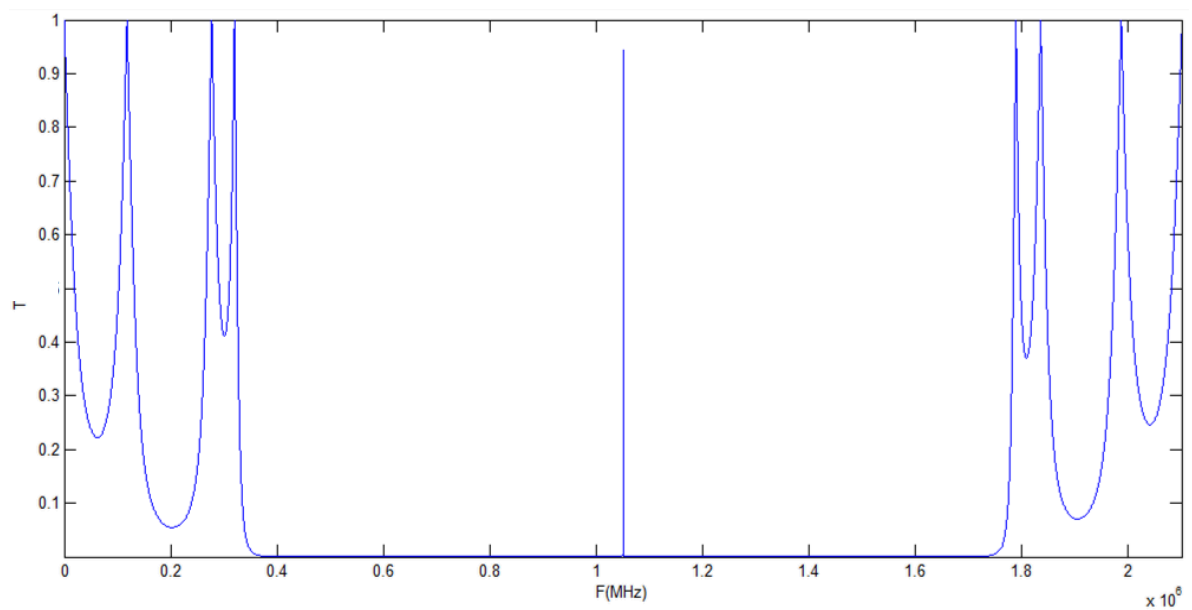


Figura 25: Simulación estructura compuesta por cavidad y dos capas de agua y vidrio a cada lado

El resultado que se observa en la figura 25 es ideal y su construcción es posible, sin embargo una estructura con capas de agua con un espesor de $357\mu\text{m}$ es muy compleja y podría acarrear altos costos. Otro factor que no se ha tenido en cuenta hasta aquí es que los valores de espesor de la cavidad son ideales y no los presentes en la cubeta de espectrofotometría.

A continuación se realizó la simulación con los valores reales de la cubeta de espectrofotometría y se realizó una ampliación sobre el pico principal de resonancia.

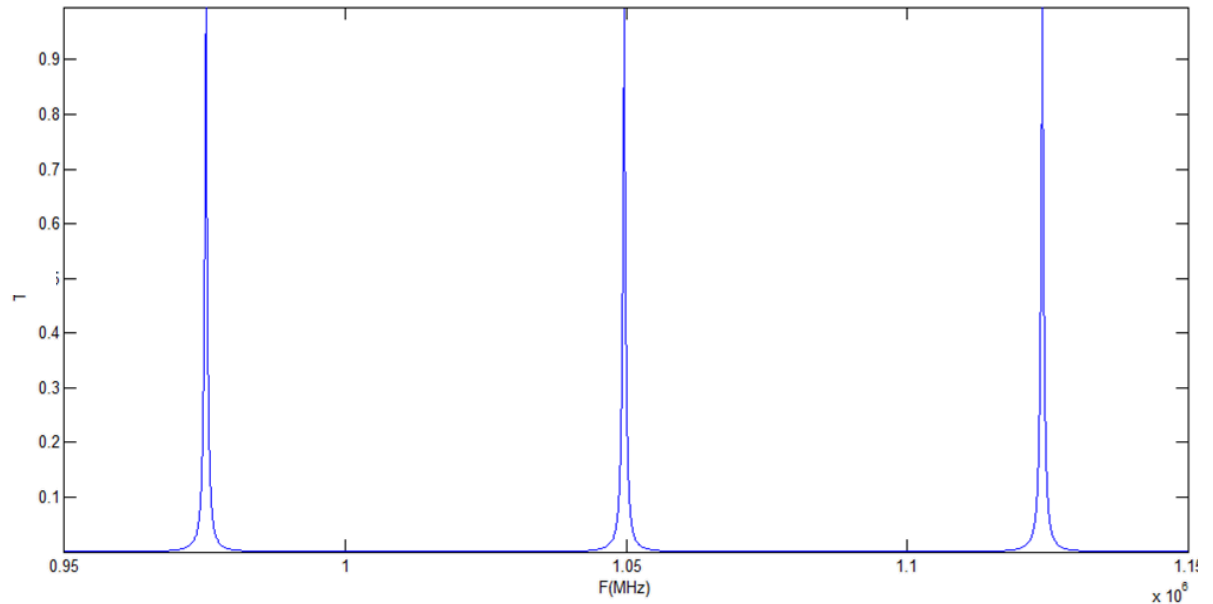


Figura 26: Simulación $n=14$ en la capa de analito

En la figura 26 se puede apreciar como al hacer el valor de n mayor a 1 aparecen nuevos picos de resonancia, todos sensibles a los cambios en la velocidad del sonido longitudinal y a la densidad de la sustancia o líquido contenido dentro de la cavidad compuesta por la cubeta de espectrofotometría.

En la figura 27 se observa la simulación de la misma estructura pero con un valor de $n=28$ en el agua.

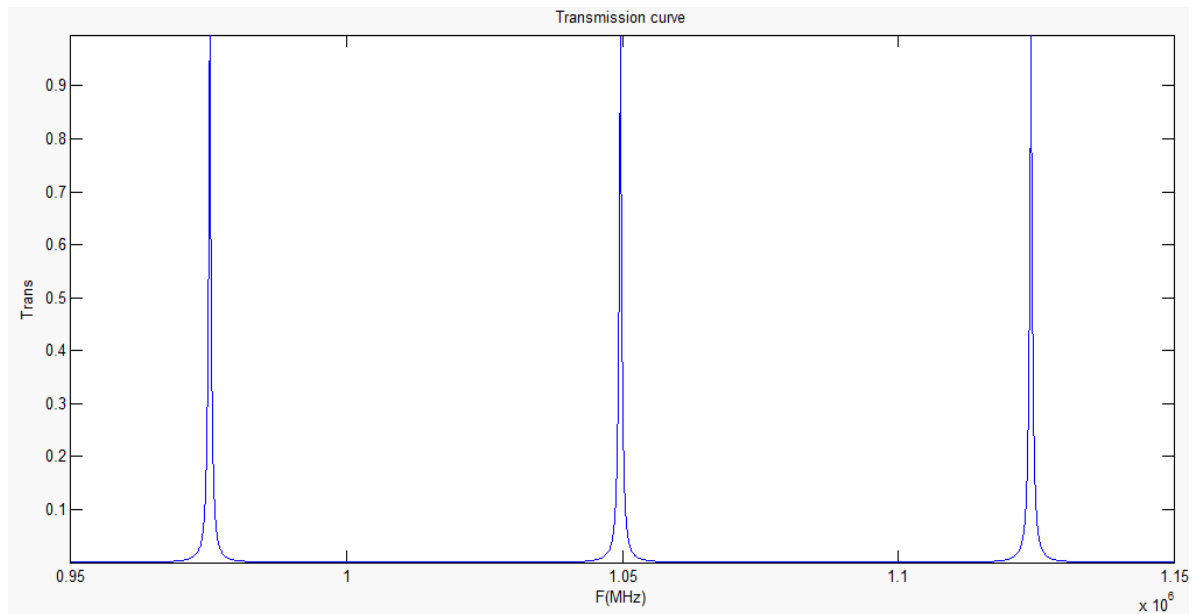


Figura 27: Simulación n=28 en la capa de agua

Como se puede ver en la figura 27 el cambio en el valor de este parámetro no afecta la respuesta del sistema. Esta afirmación es correcta siempre y cuando se cuente con un sistema ideal unidimensional sin pérdidas.

Finalmente se realizó una prueba de funcionamiento básico por medio del software de simulación de una estructura compuesta por los materiales indicados en la figura 28.



Figura 28: Estructura final diseñada y sus propiedades

La prueba consiste en realizar la simulación de la estructura con un cambio de 10 m/s en la velocidad longitudinal del sonido, inicialmente sumándolos y luego restándolos y observar si en efecto los picos de resonancia sufren alguna modificación en frecuencia.

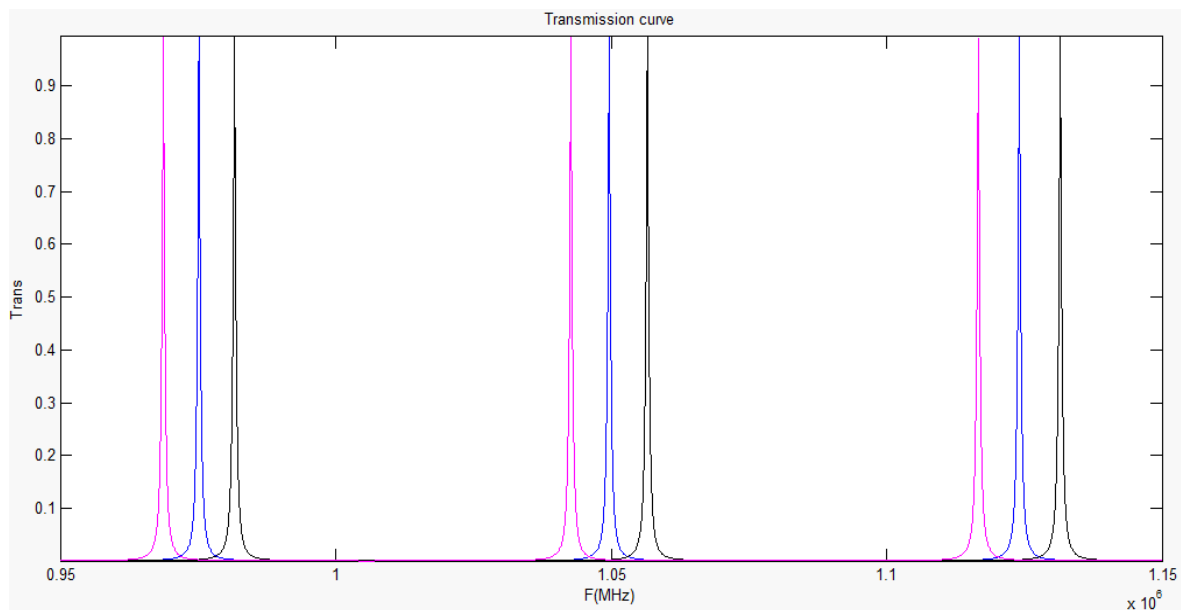


Figura 29: Simulación estructura final (azul) con cambios de +10m/s (negro) y -10m/s (morado) en la velocidad longitudinal del sonido

Como se puede observar en la figura 29 los tres picos de transmisión presentes en el rango de frecuencias comprendido entre 950 KHz y 1.15 MHz sufren cambios en su posición en el espectro debido al cambio en el valor de la velocidad longitudinal del sonido.

4.4 DISEÑO EN CAD DE LA ESTRUCTURA

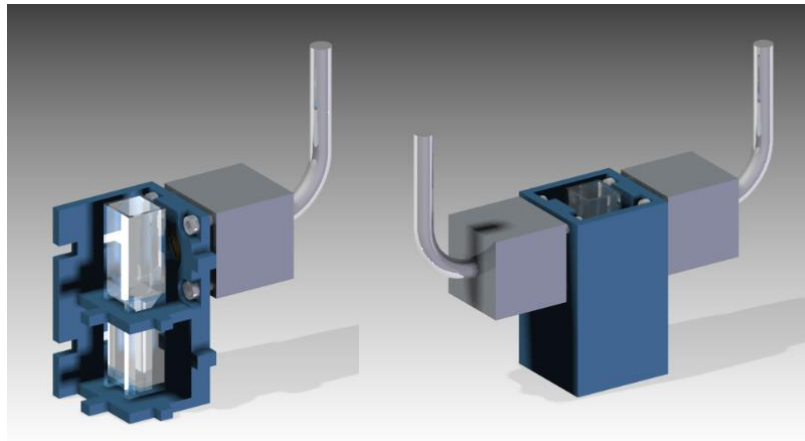
Teniendo definidas las dimensiones de la estructura, se diseñó en el software Solid Edge® la estructura tridimensional para poder avanzar a la etapa de construcción.

Para el diseño de la estructura se tuvieron en cuenta los siguientes requerimientos:

- 1- Que la cavidad principal donde se encuentra la muestra sea removible.
- 2- Que la estructura no supere los 20cm.
- 3- Que la estructura cuente con el espacio suficiente para usar los transductores cerámicos que se tienen.
- 4- Que la estructura sea fácil de esterilizar luego de cada prueba.

El diseño de la estructura se hizo de tal manera que se pudiera ingresar la cubeta de espectrofotometría de manera vertical desde un orificio superior. El contenedor tiene internamente una pieza que asegura la cubeta en su posición central y le otorga estabilidad al sistema. Los transductores cerámicos van insertados en un par de cabezales que van unidos al contenedor por medio de tornillos plásticos y tienen un par de empaques externos

para evitar el escape de fluidos. En las figuras 30a y 30b se pueden observar varias vistas de la estructura diseñada en el software Solid Edge®.



Figuras 30a y 30b: Vistas de la estructura diseñada en el software Solid Edge®

La figura 30b muestra la estructura completa mientras que la figura 30a muestra un corte que permite ver el interior del contenedor y en él, la cubeta de espectrofotometría.

4.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La figura 31 muestra el contenedor fabricado con los transductores y la cubeta de espectrofotometría. En total la estructura mide 3.2 cm entre los transductores y 5.2 cm entre los soportes metálicos.



Figura 31: Contenedor fabricado

Además del contenedor y los transductores una estructura de soporte fue construida para sostener los transductores y mantener el contenedor elevado aumentando así la estabilidad del sistema. En la figura 32 se puede observar el contenedor unido a la estructura de soporte construida. La estructura de soporte completa mide 26 cm de largo por 20 cm de alto y 4 cm de ancho.

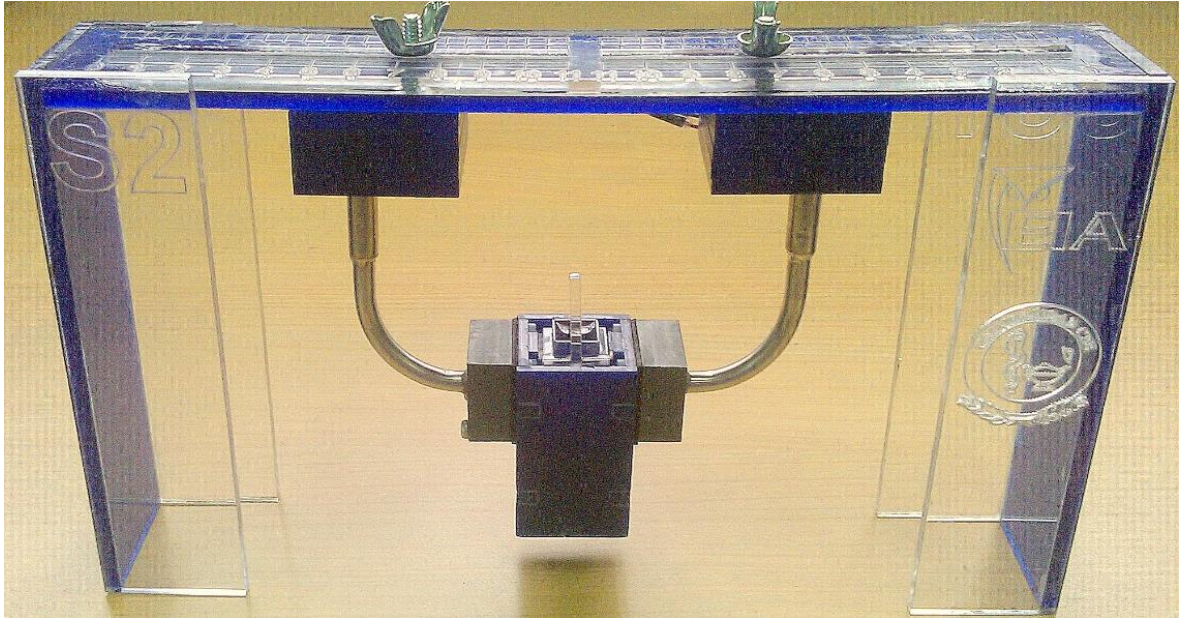


Figura 32: Contenedor y estructura de soporte

La realización de una serie de pruebas iniciales para aumentar la comprensión de los efectos producidos en el espectro de frecuencias al realizar cambios en las propiedades físicas de cada una de las capas que componen una estructura permitió facilitar el proceso de diseño y la implementación de una nueva metodología de diseño.

El hecho de haber diseñado la estructura con un software que permite realizar numerosas simulaciones y entender el comportamiento de la estructura a fondo hizo que la estructura cumpliera con el objetivo por el que fue diseñada.

La implementación de un elemento descartable en la estructura diseñada permite la realización de un sinnúmero de pruebas y su acople al área de la medicina donde la posibilidad de realizar una esterilización adecuada es un requerimiento fundamental y necesario.

Es importante resaltar que el hecho de trabajar en el rango de MHz permite el diseño de estructuras en el rango de milímetros lo cual facilita la fabricación de nuevos cristales fonónicos y disminuye el costo de esta nueva tecnología.

4.6 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

La metodología de diseño implementada en este trabajo, método de diseño en cascada de cristales fonónicos, permite realizar de manera ordenada y secuencial el diseño de nuevas estructuras basado en una lista de requerimientos inicial y una serie de recursos disponibles. Esta metodología abre las puertas a personas que no cuentan con amplia experiencia en el área de los cristales fonónicos a realizar diseños de manera sencilla y sin mucho conocimiento abriendo así la posibilidad de tener esta nueva tecnología en numerosos proyectos de investigación si la necesidad de personal altamente calificado en el tema.

El hecho de integrar un elemento descartable en la estructura posibilita el uso de la misma en aplicaciones que requieran un nivel de seguridad y desinfección alto como en pruebas de laboratorio y manejo de sustancias peligrosas.

La estructura diseñada es apta para ser implementada en países en vía de desarrollo ya que se diseñó con elementos comerciales y no requiere de un personal altamente calificado para su manipulación. De hecho esto abre las puertas a su utilización en pruebas cerca al paciente en el área de la medicina y en pruebas de campo en diversas aplicaciones.

5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICO QUE PERMITA REALIZAR LA ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL ENTREGADA POR UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO UNIDO A LA ESTRUCTURA DISEÑADA EN EL PUNTO ANTERIOR, SU ACONDICIONAMIENTO Y POSTERIOR ENVÍO A UN COMPUTADOR.

5.1 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Los cristales Fonónicos usan normalmente sistemas de adquisición de alto costo como analizadores de impedancia y amplificadores Lock-in de alta frecuencia. En este trabajo se presenta un sistema de adquisición de señales de alta frecuencia basado en una modulación de amplitud de doble banda con portadora suprimida. La implementación de este sistema es de gran utilidad ya que permite tener un método fiable y económico de medición de la respuesta de un sistema en un rango de frecuencias que puede ir desde DC hasta varios MHz.

Kankare propuso un sistema que sirve para realizar la adquisición de señales de alta frecuencia en un Amplificador lock-in de baja frecuencia realizando una modulación de doble banda con portadora suprimida y demodulación especial que permite reducir la complejidad y los costos de estas tecnologías.(Kankare, Loikas, & Salomaki, 2006)

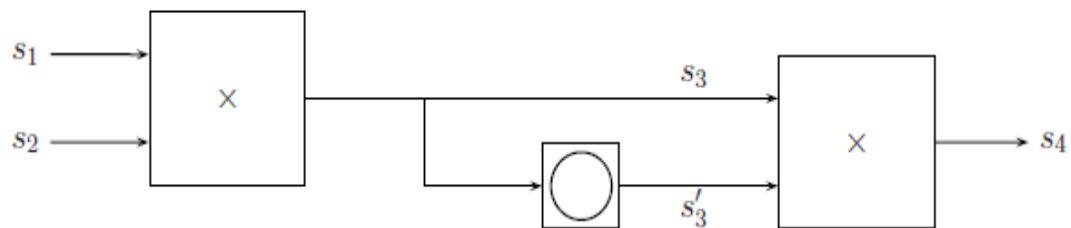


Figura 33: Diagrama de bloques del sistema propuesto por Kankare

En la figura 33 se puede observar el diagrama de bloques del sistema implementado por Kankare, en éste se realiza una modulación de doble banda con portadora suprimida de una señal de alta frecuencia S_1 y una señal de baja frecuencia S_2 . La señal modulada S_3 se pasa luego por un bloque que representa el sensor obteniéndose así una señal con variaciones en amplitud y fase, S_3' que luego es multiplicada por la señal modulada antes de ser modificada por éste S_3 . A la señal resultante, S_4 , se le realiza un filtrado pasa bandas para extraer una señal del doble de la frecuencia de la señal de baja frecuencia usada para la modulación inicial, S_2 . Todo este proceso se realiza para poder usar un lock-in de baja frecuencia en vez de uno de alta frecuencia para obtener los cambios inducidos por el sensor.

Para poder pasar a la etapa de diseño del sistema se realizó una lista de requerimientos basada en los objetivos de este proyecto y una recopilación bibliográfica en la que se incluye la técnica de Kankare.

Lista de requerimientos:

- Generar una señal de doble banda con portadora suprimida con un componente de alta frecuencia y uno de baja frecuencia.
- Utilizar un par de transductores cerámicos piezoeléctricos como emisor y receptor de la señal modulada.
- Realizar un adecuado acondicionamiento a la señal adquirida por el transductor configurado como receptor.
- Realizar una demodulación especial multiplicando la señal modulada original y la señal acondicionada adquirida por el receptor luego de pasar por el cristal fonónico permitiendo obtener la información del sensor sin necesidad de usar un amplificador Lock-in de alta frecuencia.
- Realizar un acondicionamiento a la señal demodulada para que pueda pasar a la etapa de conversión analógica digital.
- Utilizar un módulo de control adecuado para controlar las señales que deben ser generadas y realizar la conversión analógica digital de la señal final.

5.2 DISEÑO DEL SISTEMA

A partir de la lista de requerimientos se continuó con la fase de diseño del sistema electrónico y se diseñó un diagrama de bloques del circuito. El diagrama de bloques del sistema a implementar es se presenta en la figura 34.

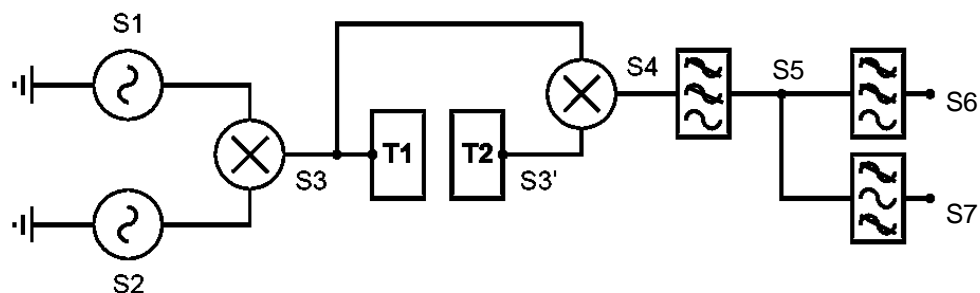


Figura 34: Diagrama de Bloques sistema electrónico

Inicialmente se realiza la multiplicación de dos señales, tanto la señal portadora S2, como la señal moduladora, S1 son señales monocromáticas de la forma.

$$S_1(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) ; S_2(t) = A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)$$

Luego de multiplicar las dos señales se obtiene:

$$\begin{aligned} S_3(t) &= A_1 A_2 \sin(w_1 t + \varphi_1) \sin(w_2 t + \varphi_2) \\ &= \frac{A_1 A_2}{2} [\cos((w_2 - w_1) t + (\varphi_2 - \varphi_1)) - \cos((w_2 + w_1) t + (\varphi_2 + \varphi_1))] \end{aligned}$$

Como se puede observar, la señal que se obtiene es una señal modulada en amplitud con doble banda y portadora suprimida. Si se realiza una transformada de Fourier a esta señal se obtienen cuatro componentes frecuenciales, $-f_1-f_2$, $-f_1+f_2$, $+f_1-f_2$, $+f_1+f_2$.

Al pasar la señal S₃ por el bloque del sensor sufre una serie de modificaciones en amplitud y fase representadas por G y Φ quedando:

$$\dot{S}_3' = \frac{A_1 A_2}{2} [G_l \cos((w_2 - w_1) t + (\varphi_2 - \varphi_1) + \phi_l) - G_h \cos((w_2 + w_1) t + (\varphi_2 + \varphi_1) + \phi_h)]$$

Tanto la banda inferior indicada con el subíndice l como la banda superior indicada con el subíndice h sufren cambios en amplitud y fase.

En el siguiente bloque la señal es multiplicada nuevamente por la señal S3, la señal modulada antes de recibir modificaciones por el sensor quedando:

$$\begin{aligned} S_4 &= \frac{A_1^2 A_2^2}{8} \{G_l [\cos(2(w_2 - w_1)t + 2(\varphi_2 - \varphi_1) + \phi_l) + \cos(-\phi_l) - \cos(2w_2 t + 2\varphi_2 + \phi_l) \\ &\quad - \cos(2w_1 t + 2\varphi_1 + \phi_l)] \\ &\quad + G_h [\cos(2(w_2 + w_1)t + 2(\varphi_2 + \varphi_1) + \phi_h) + \cos(-\phi_h) \\ &\quad - \cos(2w_2 t + 2\varphi_2 + \phi_h) - \cos(2w_1 t + 2\varphi_1 + \phi_h)]\} \end{aligned}$$

La señal obtenida tiene componentes de alta frecuencia, de baja frecuencia y corriente directa. Todos los componentes de la señal contienen la información de amplitud y fase que fueron inducidas al pasar la señal por el bloque del sensor.

La señal S4 es filtrada y con una frecuencia de corte tal que se eliminen los componentes de alta frecuencia, quedando:

$$S_5 = \frac{A_1^2 A_2^2}{8} \{G_l [\cos(-\phi_l) - \cos(2w_1 t + 2\varphi_1 + \phi_l)] + G_h [\cos(-\phi_h) - \cos(2w_1 t + 2\varphi_1 + \phi_h)]\}$$

La señal S_5 es una señal del doble de la frecuencia de S_1 y con un valor de amplitud y de offset relacionado con los cambios del bloque del sensor.

Finalmente ambas señales son separadas por filtrado y son llevadas al microcontrolador para la conversión analógico digital.

$$S_6 = \frac{A_1^2 A_2^2}{8} \{G_l(\cos(-\phi_l)) + G_h(\cos(-\phi_h))\}$$

$$S_7 = \frac{A_1^2 A_2^2}{8} \{G_l(-\cos(2w_1 t + 2\phi_1 + \phi_l)) + G_h(-\cos(2w_1 t + 2\phi_1 + \phi_h))\}$$

El circuito fue diseñado en Altium Designer y los componentes utilizados para realizar la multiplicación de las señales son AD835 de Analog Devices, multiplicadores de cuatro cuadrantes.

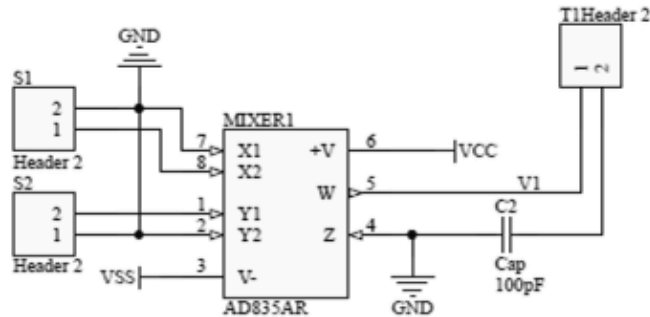


Figura 35: Configuración AD835 para la modulación de las señales

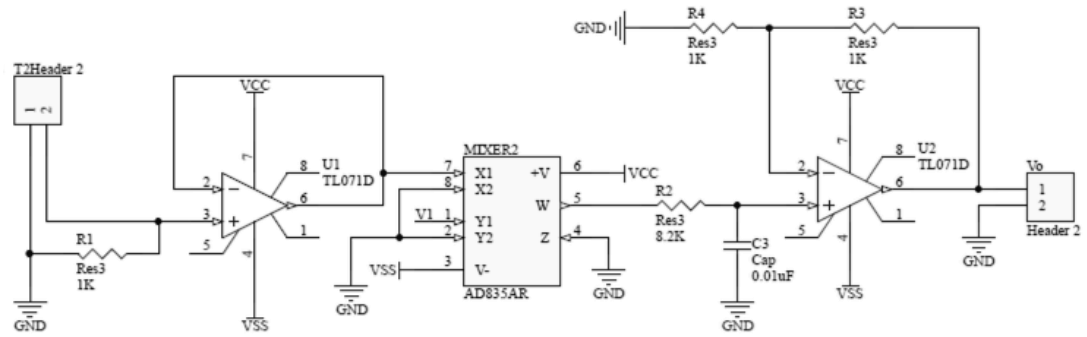


Figura 36: Demodulación especial con filtrado

Para generar las señales se utilizaron dos DDS AD9850 de Analog Devices los cuales tienen pueden generar ondas senoidales hasta de 40 MHz. Con uno de los dos se fija la señal de baja frecuencia y con el otro se realiza un barrido a través de una serie de frecuencias de interés.

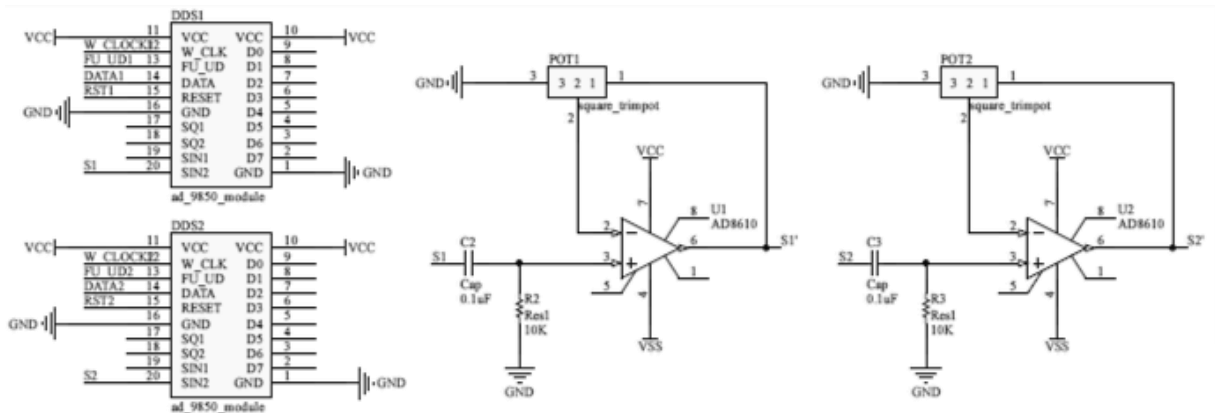


Figura 37: Generación de las señales con módulos DDS9850 y filtrado

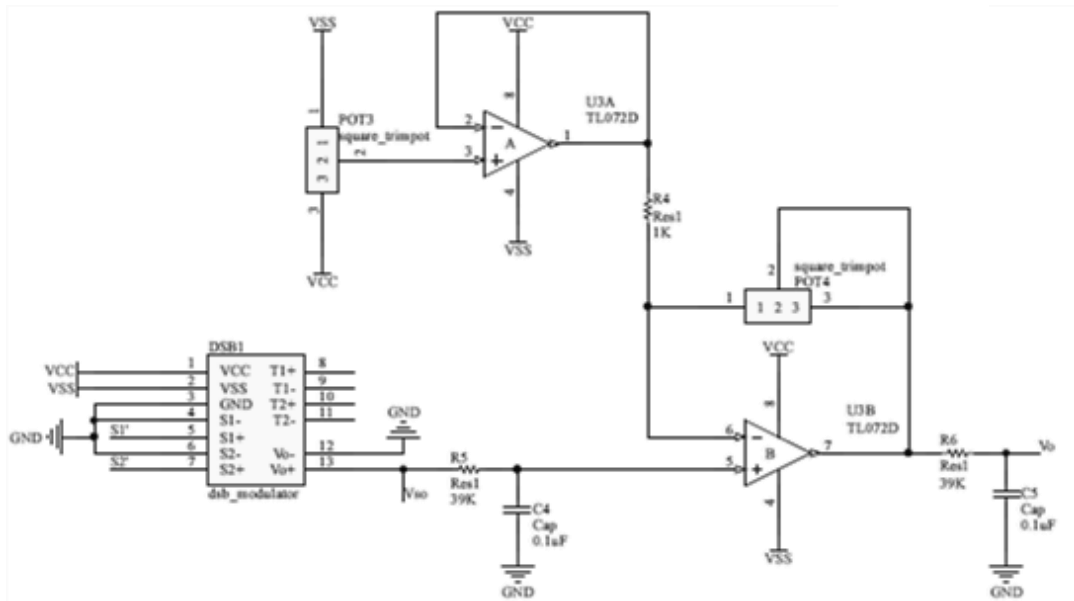


Figura 38: Acondicionamiento final de la señal demodulada

El procesamiento digital de la señal así como la programación de los DDS se realizó con un sistema de desarrollo Arduino Mega, que usa como microcontrolador un Atmel

El diseño de los circuitos impresos también se realizó en Altium y la mayoría de los componentes elegidos fueron componentes de montaje en superficie.

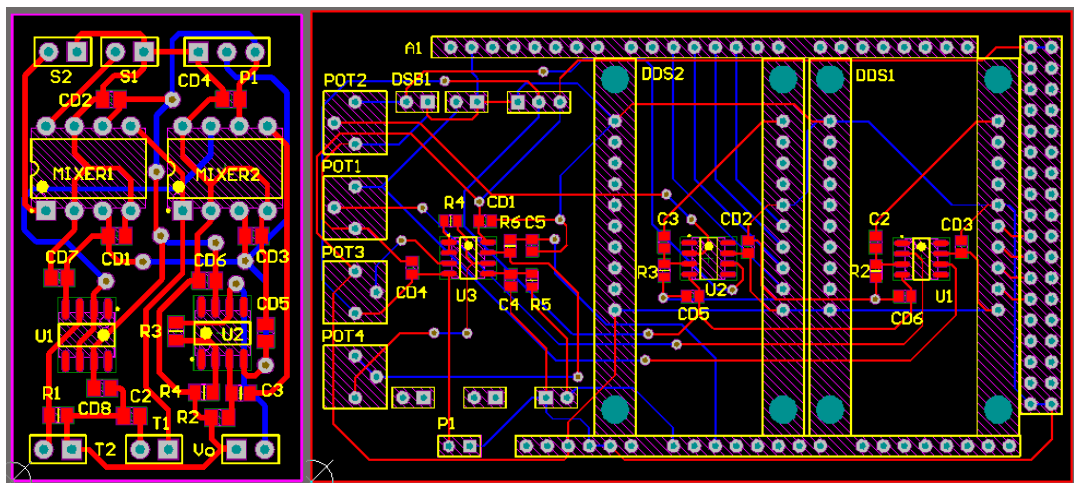


Figura 39: Tarjeta impresa diseñada en el software Altium Designer para el sistema de adquisición de datos

5.3 FABRICACIÓN

La fabricación de los circuitos impresos se contrató con la empresa ColCircuitos y los componentes se soldaron a mano en el laboratorio de Bioinstrumentación de la Escuela de Ingeniería de Antioquia.

En la figura 40 se puede observar el circuito final, en la parte superior se encuentran los DDS, de color azul y a su lado la etapa encargada de la tarea más importante del sistema, la modulación y demodulación de la señal generada por los DDS.

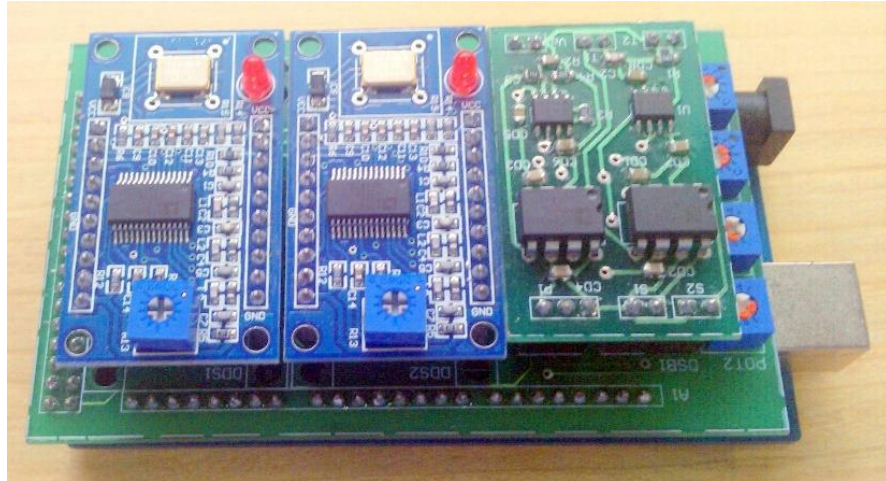


Figura 40: Sistema de adquisición de datos fabricado

5.4 PRUEBAS PRELIMINARES

Inicialmente se realizaron unas pruebas preliminares en las que se desconectaron los transductores ultrasónicos y la señal modulada se pasó directamente a la etapa de demodulación para así poder verificar el funcionamiento de cada etapa del circuito de manera ideal. Haciendo uso de un osciloscopio se midió el voltaje en 5 puntos clave del circuito, en las dos señales generadas por los módulos DDS, en la señal luego de pasar por la modulación, en la señal luego de pasar por la demodulación y en la señal final antes de ser enviada al microcontrolador.

5.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la figura 41 se pueden observar las dos señales generadas por los módulos DDS. La primera, una señal de 1 KHz y la segunda de 1 MHz.

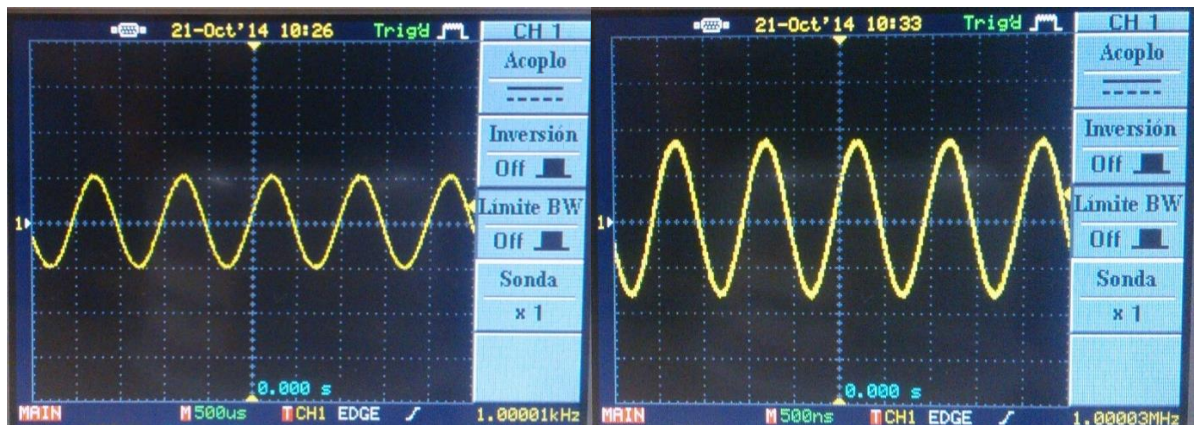


Figura 41: Señales generadas por los DDS de Analog Devices AD9850

En la figura 42 se puede observar la señal luego de pasar por el primer multiplicador. Como se puede ver la señal es una señal modulada en amplitud con doble banda y portadora suprimida. Para poder adquirir de mejor manera la señal y que el osciloscopio pudiera mantener estable la visualización se usó la señal de baja frecuencia, representada en azul, como señal para el trigger del osciloscopio.

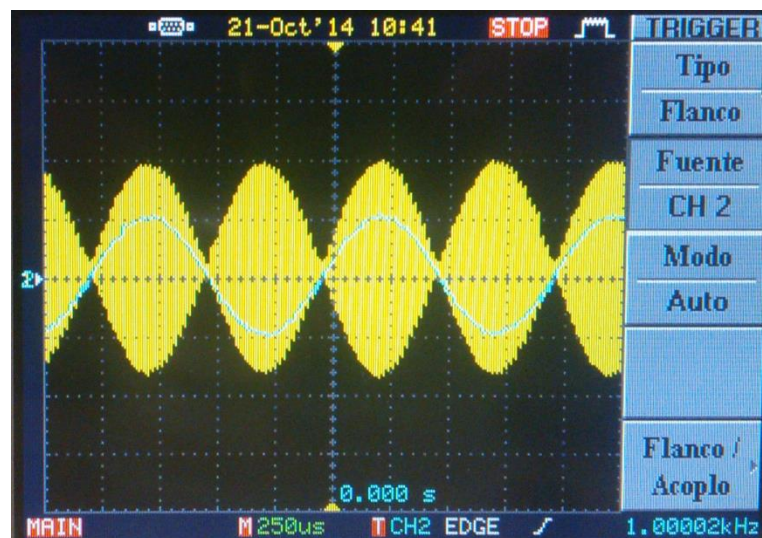


Figura 42: Señal modulada de doble banda con portadora suprimida

En la figura 43 se puede observar la señal luego de pasar por la etapa de demodulación especial representada en color amarillo. La señal original de baja frecuencia se usó como referencia para el trigger. Cuando la señal pasa por la etapa de demodulación también pasa por una etapa de filtrado en la cual se obtiene una señal del doble de la frecuencia de la señal de baja frecuencia ingresada al inicio con información de la fase y la amplitud inducidas por el sensor.

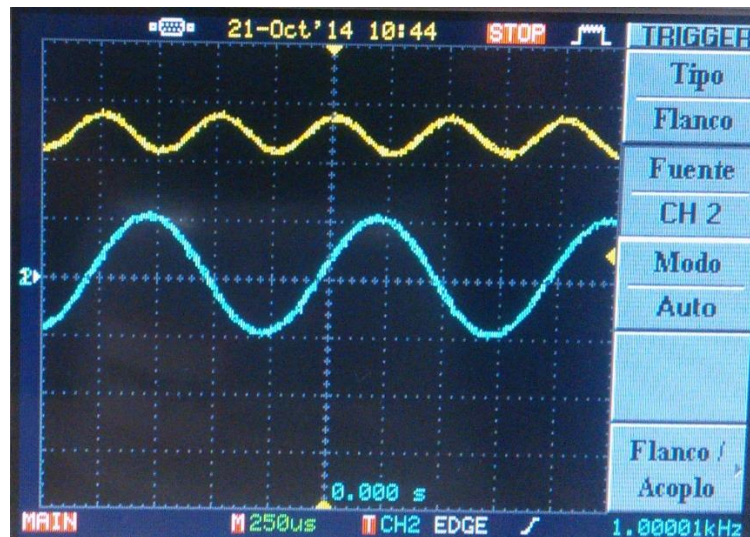


Figura 43: Señal luego de la demodulación especial

La señal obtenida es luego pasada por un nuevo bloque de filtrado y finalmente se obtiene una señal de corriente directa que está relacionada con los cambios en fase y en amplitud inducidos por los transductores y que está lista para ser ingresada al conversor analógico digital. En la figura 44 se puede observar la salida final del circuito antes de ingresar al conversor analógico digital.

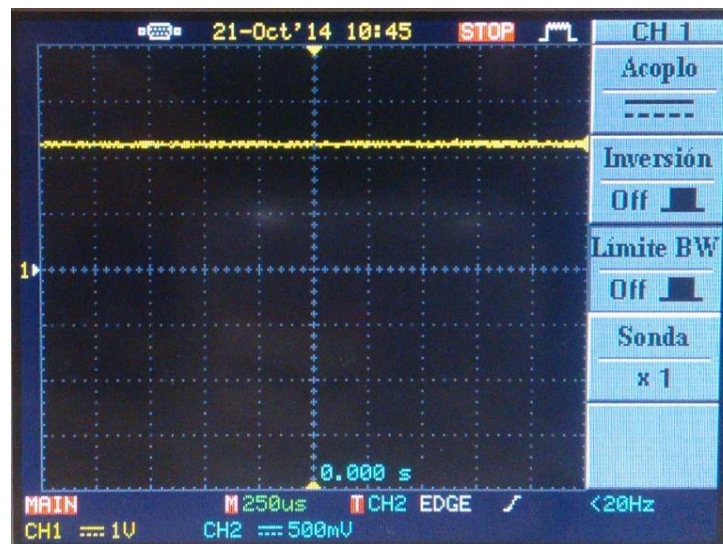


Figura 44: Señal final DC con información sobre amplitud y fase

5.6 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En las pruebas desarrolladas el sistema probó ser suficientemente estable y las pruebas demostraron ser repetibles haciendo a este un sistema fiable que puede ser utilizado para numerosas pruebas y aplicaciones en diversas áreas.

Habiendo eliminado la necesidad de usar equipos de alto desempeño y costo como amplificadores lock-in y analizadores de redes se abrió la posibilidad a realizar pruebas de campo debido a la reducción de costos y a la reducción en tamaño del sistema diseñado.

El uso de la modulación de doble banda con portadora suprimida y una demodulación especial probó ser satisfactorio para la obtención de la información de fase y amplitud en cristales fonónicos y estructuras resonantes.

El haber realizado una profunda fundamentación matemática para la implementación del sistema de instrumentación permitió la obtención de muy buenos resultados con un sistema de una complejidad y requerimientos mucho más simples que los de los sistemas convencionales como amplificadores lock-in de alta frecuencia y analizadores de redes

Se logró obtener una ecuación que determina el comportamiento de la salida del circuito que depende de los cambios en amplitud y fase del sensor.

$$S_6 = \frac{A_1^2 A_2^2}{8} \{G_l(\cos(\phi_l)) + G_h(\cos(\phi_h))\}$$

Producto de este trabajo se presentó un manuscrito del artículo titulado "Electronic characterisation system for measuring frequency changes in phononic crystals" a la revista Electronic Letters el cual está siendo sometido a revisión por parte de pares externos para su publicación.

6. DISEÑO DE UNA APLICACIÓN QUE PERMITA VISUALIZAR LOS VALORES OBTENIDOS POR EL DISPOSITIVO EN EL COMPUTADOR Y SU POSTERIOR ALMACENAMIENTO.

Para el diseño de la aplicación encargada de la adquisición de la señal entregada por el dispositivo diseñado en el punto anterior y su posterior visualización se usó parte de la metodología de diseño de software en cascada propuesta por Winston Royce, el mismo modelo usado en el diseño del software de simulación de cristales fonónicos y estructuras resonantes desarrollado en la primera etapa de este proyecto (Amo, Loïc & Martinez, 2005).

6.1 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS

Inicialmente se realizó una lista de requerimientos basada en los objetivos propuestos para este trabajo.

El objetivo principal del sistema informático es poder observar los datos obtenidos por el sistema de adquisición diseñado en la etapa anterior. Este software es muy importante ya que permite cuantificar el potencial que tiene el sensor en diversas aplicaciones.

Lista de requerimientos:

- **Requerimientos Funcionales:**

- El usuario debe poder seleccionar de un menú debidamente referenciado en la interfaz gráfica de usuario el puerto que hace referencia al dispositivo.
- El usuario debe poder ingresar la velocidad de transmisión de datos o Baud Rate en un cuadro de texto debidamente referenciado en la interfaz gráfica de usuario.
- El usuario debe poder seleccionar por medio de un botón debidamente referenciado en la interfaz gráfica de usuario si desea vincular el dispositivo al software para poder comenzar a recibir datos.
- El usuario debe poder seleccionar por medio de un botón debidamente referenciado en la interfaz gráfica de usuario si desea desvincular el dispositivo del software para terminar la recepción de datos.
- El usuario debe poder elegir cuando comenzar a visualizar la información enviada por el dispositivo al presionar un botón debidamente referenciado en la interfaz gráfica de usuario.
- El usuario debe poder guardar la información enviada por el dispositivo al presionar un botón debidamente referenciado en la interfaz gráfica de usuario.

- El usuario debe poder acceder a la información guardada al presionar un botón debidamente referenciado en la interfaz gráfica de usuario.
- **Requerimientos de Desempeño:**
 - El software debe realizar la adquisición de cada paquete de datos enviado por el microcontrolador en el dispositivo y graficarlos en la interfaz gráfica de usuario antes de la llegada del siguiente y permitirle al usuario almacenar estos datos y poder acceder a ellos de nuevo si así lo desea.
- **Requerimientos de Interfaz:**
 - El sistema a desarrollar no tiene requerimientos de interfaz ya que no interactúa con otros sistemas informáticos.
- **Requerimientos Operacionales:**
 - El modelo de interacción de este sistema informático con el usuario es de interacción clásica. Se basa en el ingreso de datos por medio de un teclado en cuadros de texto y el uso del mouse o puntero para interactuar y realizar selecciones de menús y accionar botones de la interfaz gráfica de usuario.
 - Los datos obtenidos se presentan gráficamente en la interfaz gráfica de usuario.
- **Requerimientos de Recursos:**
 - Intel Core I5 similar o superior.
 - 4 GB de memoria RAM.
 - 2GB libres de memoria interna.
- **Requerimientos de Seguridad:**
 - El sistema a desarrollar no tiene requerimientos de seguridad.
- **Requerimientos de Portabilidad:**
 - Windows 7 de 32 bits similar o superior.
 - MatLab® 2012 o superior

6.2 DISEÑO DEL SISTEMA Y DEL SOFTWARE

Diagrama general y diagrama de funciones:

A partir de la lista de requerimientos se continuó con la fase de diseño del sistema y se diseñó un diagrama general, figura 45, en el que se muestra el sistema informático y sus componentes seguido de un diagrama de funciones, figura 46, que muestra la serie de relaciones y transformaciones que sufren los parámetros ingresados por el usuario para finalmente obtener los resultados esperados.

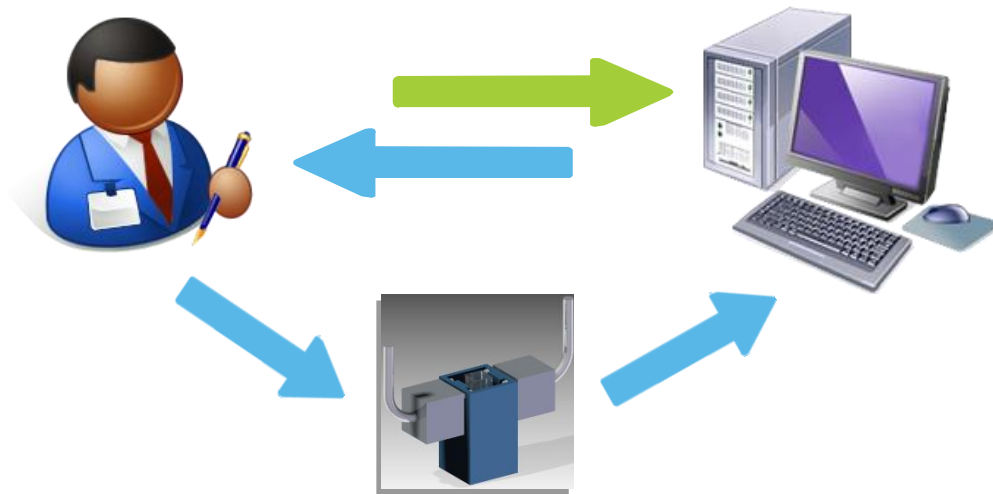


Figura 45: Diagrama general del sistema informático de adquisición de datos



Figura 46: Diagrama de funciones del software de adquisición de datos

Inicialmente el usuario debe darle la orden al programa para que cargue los puertos y permita luego seleccionar entre una serie de dispositivos conectados al sistema cual es el sistema de adquisición. Un paso importante es la definición de la velocidad de transmisión

de datos o Baud Rate, ya que si no se le indica al sistema el valor adecuado es posible que haya pérdida de información.

Teniendo los parámetros iniciales definidos se puede proseguir a realizar la conexión con el sistema. Este paso provoca la obtención automática de datos que envía el microcontrolador ATMEL por comunicación serial y grafica la información en un eje de la interfaz gráfica de usuario. El software le da luego la opción al usuario de guardar la información adquirida o de descartarla y luego se desconecta del dispositivo. Si el usuario así lo desea puede continuar realizando más pruebas o cerrar el programa.

Mockup:

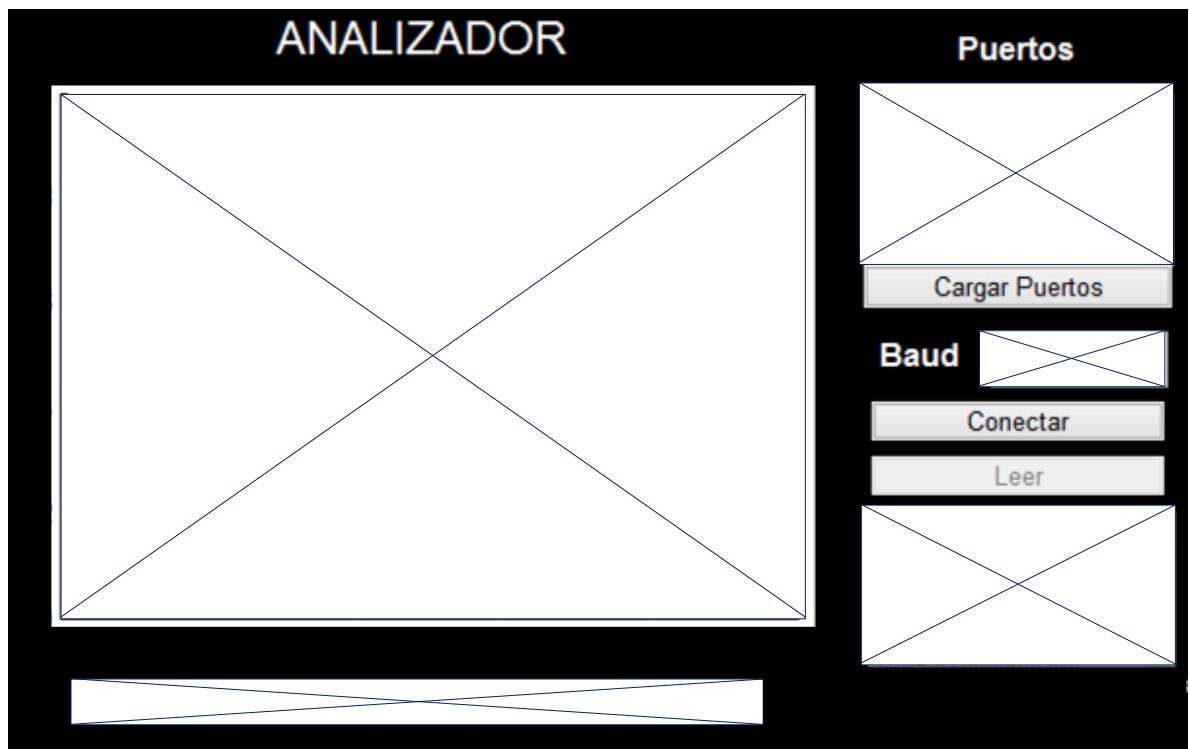


Figura 47: Mockup de la interfaz gráfica de usuario del software de adquisición de datos

En la figura 47 se puede observar el Mockup diseñado para la interfaz gráfica de usuario. Sobre la parte superior izquierda se encuentra un eje donde se mostrarían los datos que se adquieren del sensor, sobre la derecha se encuentran los botones y unos cuadros de texto con los cuales se configurarían los puertos y se comenzaría la recepción de datos. Finalmente sobre la parte inferior se encuentra un espacio reservado para un botón con el que se guardarían los datos obtenidos.

6.3 CODIFICACIÓN

A partir del diagrama de funciones, figura 46, se pasó a escribir el código en Matlab®. Básicamente se realiza una adquisición de datos por medio de un protocolo de comunicación serial y cada vez que se completa la adquisición de un paquete de datos que contiene la respuesta del sistema en 600 puntos frecuenciales diferentes se realiza un filtrado y luego se grafica el espectro de frecuencias en la interfaz gráfica de usuario. El código completo se puede encontrar en el apartado de anexos.

Interfaz gráfica de usuario

En la figura 48 se puede apreciar la interfaz gráfica de usuario diseñada.

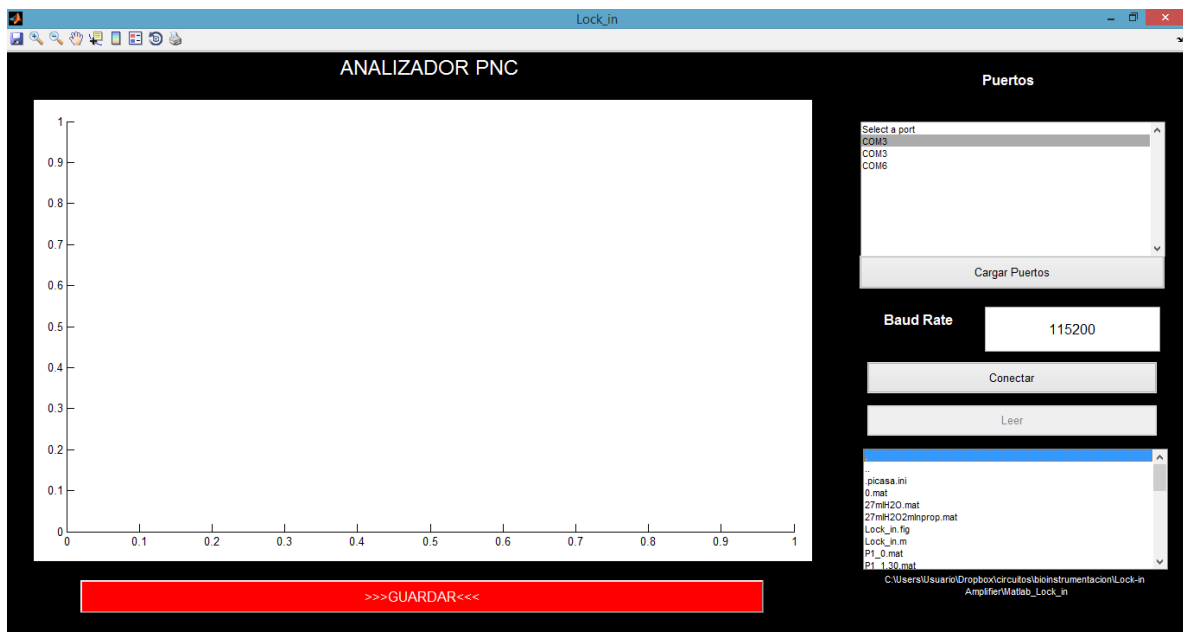


Figura 48: Interfaz de usuario del software de adquisición de datos en MatLab

Sobre la derecha se tiene un menú en el que se presentan los puertos disponibles y sobre la base del menú se encuentra un botón con el cual se refrescan estos puertos. El cuadro de texto sobre la derecha permite ingresar el valor del Baud-Rate necesario para realizar una adecuada comunicación con el dispositivo conectado al puerto seleccionado. Debajo del cuadro de texto se encuentran dos botones. El primero, “Conectar”, vincula el dispositivo conectado al puerto seleccionado en el menú superior al programa, mientras que el segundo, “Leer”, inicia la lectura de datos y permite su visualización en el área central para gráficos. El botón inferior, “guardar”, permite guardar la información que se observa en el gráfico en la carpeta que el usuario elija. Sobre la derecha, en la parte inferior de la interfaz se encuentra un menú en el cual se pueden elegir archivos guardados. Si el usuario presiona dos veces sobre un archivo este se grafica inmediatamente permitiendo así realizar comparaciones entre diferentes experimentos. Finalmente para dejar de leer datos

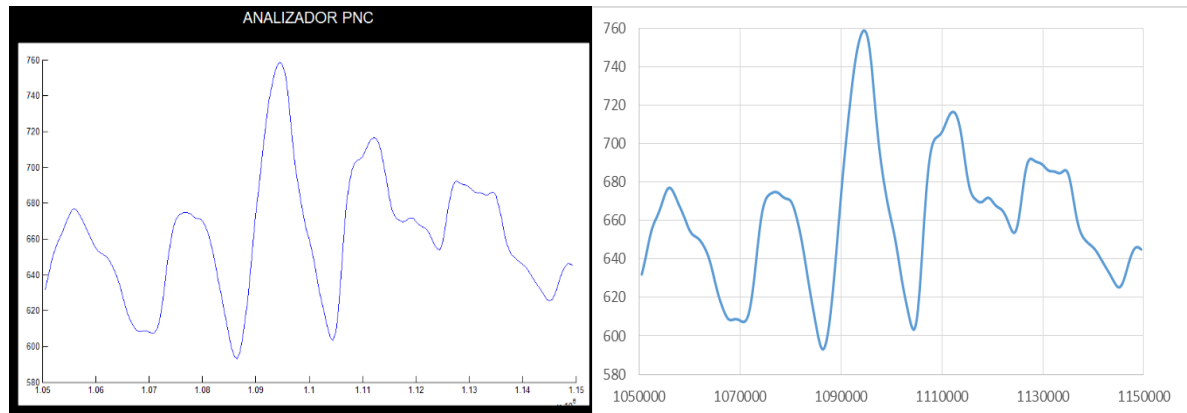
del sensor se presiona nuevamente sobre el botón “Leer” y luego para desvincular el puerto se presiona sobre el botón “Conectar”.

6.4 PRUEBA DEL SISTEMA

Una serie de pruebas funcionales fueron realizadas inicialmente. En estas pruebas se comprobó el funcionamiento de la transmisión de datos y de los botones y menús. Luego, habiendo comprobado que el sistema funcionaba correctamente se pasó a realizar una prueba preliminar haciendo uso del sistema de instrumentación electrónico y de la estructura con propiedades acústicas. En esta prueba se realizó la adquisición de datos con el software diseñado y con la terminal de Arduino 10.6. El objetivo de esta prueba era comprobar que los datos adquiridos por el software diseñado son los mismos que los datos adquiridos por la terminal de Arduino usada como referencia.

6.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En las figuras 49a y 49b se pueden observar las gráficas obtenidas por ambos medios. La señal adquirida por el software diseñado se muestra en la figura 49a, mientras que la señal adquirida por la terminal de Arduino se muestra en la figura 49b.



Figuras49a y 49b: Datos adquiridos por el software diseñado, izquierda, y por la terminal de Arduino, derecha.

A simple vista pareciera que el software funciona correctamente pero al realizar una comparación dato a dato se encontró que las gráficas obtenidas tenían un desfase en la frecuencia. En la figura 50 se puede observar este desfase.

La cantidad de datos obtenida por el software diseñado es menor que la cantidad de datos obtenida por la terminal de Arduino. Luego de identificar el problema se realizó la prueba 10 veces más y se encontró que cada vez se adquiría un número diferente de datos. En la tabla 7 se pueden observar los resultados de esta prueba. Vale la pena resaltar que los valores de amplitud obtenidos en todas las pruebas corresponden a los valores obtenidos en la prueba de referencia de la terminal de Arduino.

<i>prueba</i>	<i>referencia</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
# datos	600	598	599	600	599	599	596	598	600	599	596
Diferencia # de datos		2	1	0	1	1	4	2	0	1	4

Tabla 7: Número de datos adquiridos por prueba y diferencia con original

Para solucionar este problema se agregó un tiempo de espera en el código del microcontrolador en el momento del envío de los datos, para así dar tiempo suficiente al ordenador para adquirir los datos en su totalidad. Al repetir la prueba se encontró que el inconveniente estaba resuelto y que la solución fue adecuada.

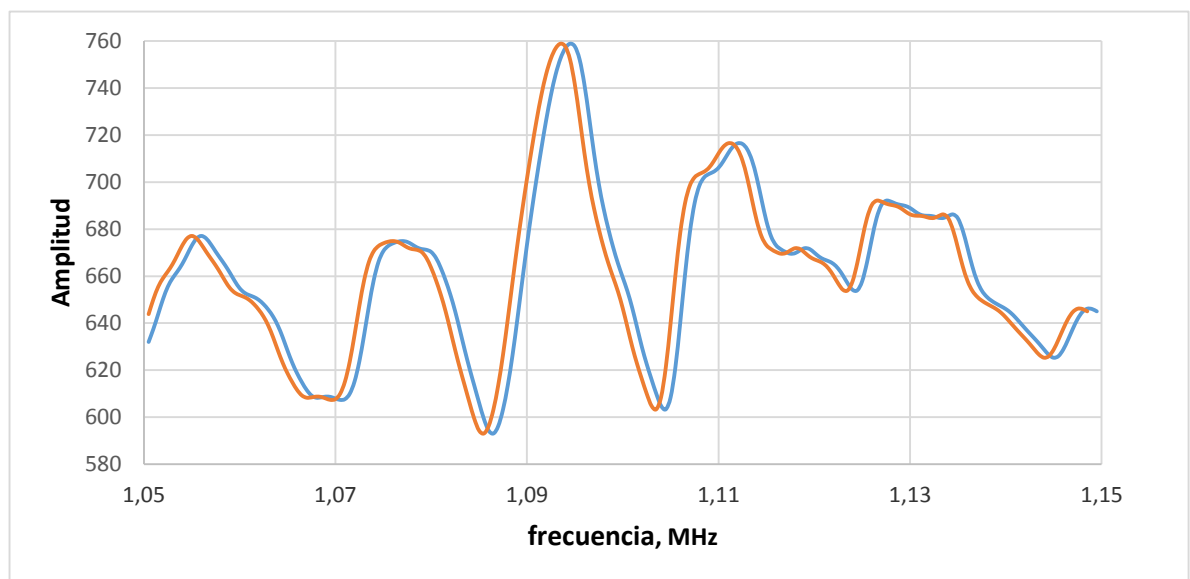


Figura 50: Comparación dato a dato de las señales adquiridas con el software diseñado y la terminal de Arduino.

6.6 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

El haber realizado las pruebas preliminares de funcionamiento y comparar las señales adquiridas con un método de referencia probó ser muy importante para el desarrollo de este software. Si no se hubiera realizado una comparación con un software de referencia posiblemente no se habría detectado que el número de datos adquirido no era constante y se habría mantenido un problema de estabilidad importante en el sistema.

El software diseñado tiene una interfaz de usuario sencilla e intuitiva y facilita el proceso de capacitación en su uso.

El uso del software Matlab para realizar la codificación del sistema informático facilitó el diseño de la interfaz gráfica de usuario y la comunicación entre el dispositivo y el ordenador. Sin embargo debido al costo asociado que trae un software que requiere una licencia se recomienda el uso de otro software como Python versión 3.4.2 que es de uso libre.

7. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SENSOR CONSTRUIDO.

Para comenzar a realizar pruebas con el sistema de sensado construido es necesario diseñar primero un protocolo de medición que permita estandarizar las mediciones y poder capacitar al usuario en el uso del sistema.

7.1 PROTOCOLO DE MEDICIÓN

El protocolo de medición diseñado cuenta con 14 pasos, cada uno de los cuales debe ser realizado para poder pasar al siguiente.

- 1- Encender el computador y abrir la aplicación PnC Reader
- 2- Conectar el sistema de Adquisición al Computador por un puerto USB.
- 3- Oprimir el botón “Cargar puertos” en la interfaz de usuario.
- 4- Verificar que el puerto al que fue conectado el sistema de sensado corresponda a uno de los puertos que aparecen en la lista y seleccionarlo.
- 5- Llenar el contenedor con el líquido necesario.
- 6- Preparar la cubeta llenándola con la sustancia que se desea analizar.
- 7- Insertar la cubeta con la muestra.
- 8- Presionar el botón “Leer” para comenzar a realizar la lectura de la información de la muestra.
- 9- Si se desea guardar la información presione el botón “Guardar” e indique la carpeta donde desea almacenar los datos a la vez que el nombre del archivo.
- 10- Al finalizar el análisis presione el botón “Desconectar”.
- 11- Retirar la cubeta con la muestra.
- 12- Si desea realizar un nuevo análisis vuelva al paso #6 de lo contrario cierre el programa con el botón “Cerrar”.
- 13- Desconecte el dispositivo del computador.
- 14- Retire los fluidos del contenedor y haga una limpieza del sistema siguiendo la reglamentación técnica necesaria para el tipo de muestra que se analizó. Recuerde descartar la cubeta si se trata de un fluido biológico o una sustancia considerada de riesgo medio o alto.

7.2 EXPERIMENTACIÓN

Para evaluar el desempeño del sensor construido se realizaron una serie de pruebas siguiendo el protocolo de medición propuesto en el punto anterior.

Inicialmente se realizaron pruebas para probar el funcionamiento del sistema electrónico y una estructura sencilla compuesta por una cavidad. Las propiedades de la cavidad se eligieron siguiendo la metodología de diseño de cristales fonónicos propuesta en este trabajo.

Cavidad para probar cambios de velocidad longitudinal del sonido alrededor de 1500m/s con transductores cerámicos y en un rango de trabajo alrededor de 1.05MHz.

$$f = 1.05MHz \quad ; \quad c = 1500m/s$$

$$d_T = \frac{n\lambda}{2} \quad ; \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad \therefore \quad f = \frac{nc}{2d_T} \quad \therefore \quad d_T = \frac{n(1500m/s)}{2(1.05MHz)} = n0.714mm$$

$$n = 14 \quad \therefore \quad d_T = 1cm$$

En la figura 51 se muestran la capas de la estructura usada en las pruebas preliminares, a su vez se presentan las propiedades físicas necesarias para realizar la simulación, la densidad, la velocidad longitudinal del sonido y el espesor de la capa.



Figura 51: Estructura usada en pruebas preliminares y sus propiedades

Prueba n-Propanol

La primera prueba que se realizó fue con soluciones de n-Propanol en Agua destilada. Las soluciones preparadas variaron del 0 al 4% en fracción volumétrica de n-Propanol y la densidad y velocidad del sonido de cada solución se presentan en la tabla 8.

Color	% V/V	ρ (gr/cc)	c (m/s)
	0	0,9980	1493,0
	0,81	0,9968	1498,4
	1,62	0,9957	1503,7
	2,43	0,9945	1509,1
	3,25	0,9934	1514,6
	4,07	0,9922	1520,0

Tabla 8: Soluciones de n-Propanol usadas en pruebas preliminares

Prueba Solución Salina

La segunda prueba que se realizó fue con solución salina. Las soluciones preparadas variaron desde una solución salina isotónica de 0.9% de concentración hasta una solución salina hipotónica de 0.45% de concentración. La densidad y velocidad del sonido de cada solución se presentan en la tabla 9.

Color	% g/g	ρ (gr/cc)	c (m/s)
	0,9	1,0043	1495,8
	0,72	1,0030	1493,2
	0,6	1,0022	1491,47
	0,51	1,0015	1490,17
	0,45	1,0011	1489,3

Tabla 9: Propiedades de las soluciones de NaCl en agua destilada usadas

Prueba n-Propanol vs Etanol

Luego de verificar el funcionamiento del sensor en una estructura simple se pasó a realizar pruebas con una estructura más compleja. La estructura propuesta en capítulos anteriores con la cubeta de espectrofotometría como elemento descartable se utilizó en las pruebas siguientes.

El objetivo de esta prueba era, no sólo verificar el funcionamiento del sistema con el elemento descartable sino observar su comportamiento al usar dos soluciones con solutos de diferentes características. La densidad y velocidad del sonido de cada solución se presentan en la tabla 10.

Soluto	Color	% V/V	ρ (gr/cc)	c (m/s)
Etanol		0,5	996	1514
n-Propanol		0,5	992	1520

Tabla 10: Propiedades de las soluciones de etanol y propanol usadas

En este caso las soluciones tienen como solvente agua destilada para centrar su velocidad longitudinal del sonido, c , alrededor de los 1500 m/s y tienen una diferencia de 6 m/s, lo cual no presenta dificultades a la hora de realizar la medición.

Prueba Leche Comercial

Una de las potenciales aplicaciones del sensor desarrollado es su uso en la industria alimenticia, los productores de lácteos son unos de los potenciales sectores de la industria alimenticia que se verían beneficiados con su uso y es por esto que se condujo una simple prueba para verificar que el sensor puede detectar entre diferentes productos lácteos comerciales.

En esta prueba se usaron tres productos lácteos de la misma marca, que por motivos de protección de marca se ocultará su nombre. El primer producto es una leche entera, el segundo una leche deslactosada semidescremada y el tercer producto es una leche entera con sabor a fresa.

En esta prueba no sólo se obtuvieron los datos del sensor sino que se simuló una sustancia ficticia que tuviera un pico de transmisión en el mismo punto que las muestras para así determinar el cambio en la velocidad del sonido que se presenta entre una y otra.

7.3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Prueba n-Propanol

En la figura 52 se pueden observar los resultados de la prueba con soluciones de n-Propanol en agua destilada. Los datos obtenidos por el sensor se presentan como líneas punteadas y los datos simulados por el software diseñado como líneas sólidas. Cada solución se presenta con un color diferente según su concentración, Azul 0%, Rojo 0.8%, Verde 1.6%, Morado 2.4%, Negro 3.2% y Cian 4%.

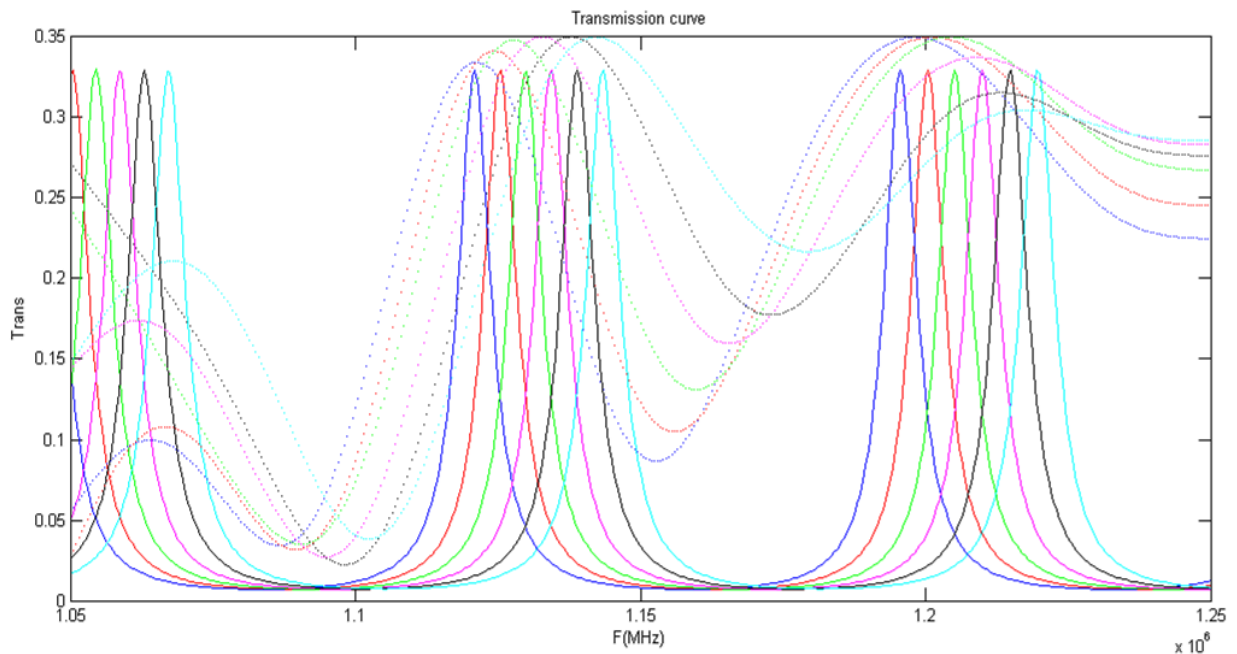


Figura 52: Resultados pruebas experimentales (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de n-propanol en agua destilada.

El objetivo de esta primera prueba era demostrar que los picos de resonancia se desplazan a medida que aumenta o disminuye la velocidad del sonido longitudinal de la solución analizada, Por esta razón se fijó el rango de frecuencias alrededor del pico central de transmisión ubicado entre 1.1 y 1.15 MHz.

Es claro cómo el comportamiento de los picos centrales es acorde a la simulación y el objetivo de esta primera prueba se cumple satisfactoriamente. A medida que aumenta la concentración de la solución, aumenta la velocidad longitudinal del sonido de la misma, lo que produce un desplazamiento hacia la derecha en frecuencia de los picos de transmisión.

Para poder observar de mejor manera la relación existente entre las simulaciones y la respuesta del sensor se realizó una transformada exponencial a la señal obtenida. Esta transformada no afecta en ningún sentido la posición de los picos de transmisión en el eje de frecuencias pero permite visualizarlos con un mayor factor de calidad y eliminando la línea base creciente sobre la que se encuentran. Siendo X los datos obtenidos por el sensor y Y el resultado de la transformada, la operación realizada sería de la forma $Y = e^X$.

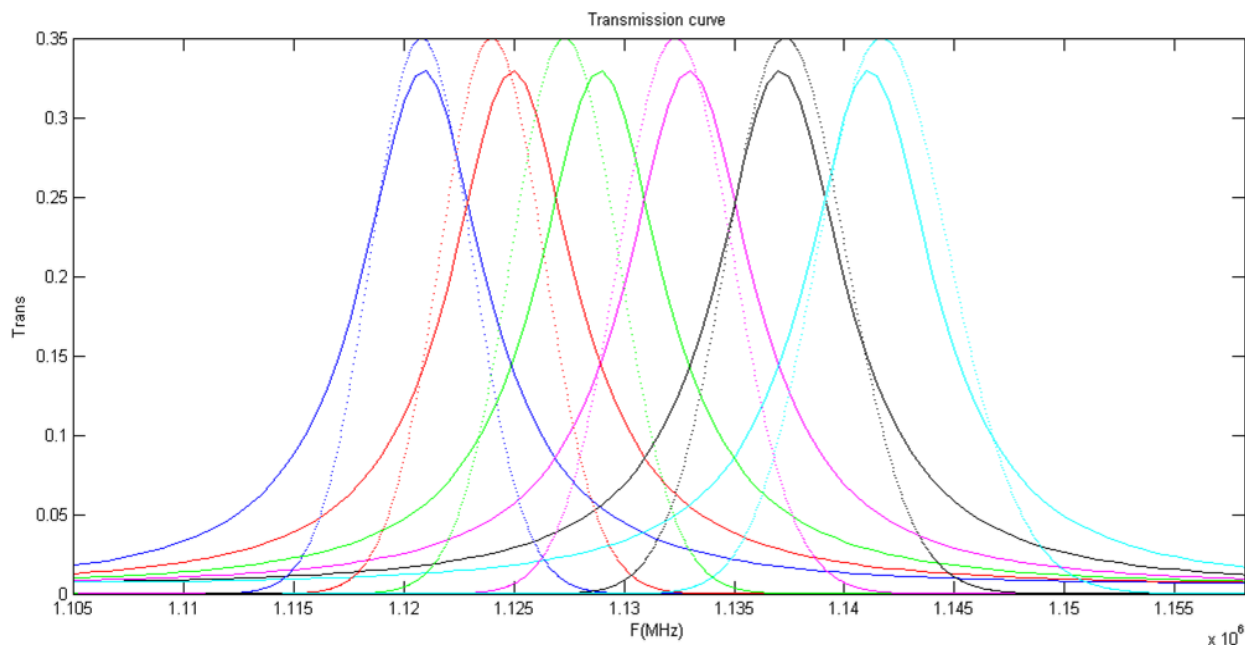


Figura 53: Resultados pruebas experimentales con transformación exponencial (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de n-propanol en agua destilada

En la figura 53 se presenta la comparación entre los resultados experimentales con una transformación exponencial y las simulaciones haciendo énfasis en los picos centrales de transmisión. Cada solución se presenta con un color diferente según su concentración, Azul 0%, Rojo 0.8%, Verde 1.6%, Morado 2.4%, Negro 3.2% y Cian 4%.

La transformación exponencial realizada permite observar de mejor manera la relación existente entre las simulaciones y la experimentación.

En la figura 53 se puede observar como en la solución con una concentración de 1.6% de n-Propanol, representada con el color verde, el error es mayor a las demás. Este error se puede atribuir mayormente a errores procedimentales en el protocolo de experimentación. Se propone realizar una mejora al protocolo teniendo en cuenta el control de la temperatura de las soluciones que se analizan y realizando una mezcla controlada que permita asegurar que todo el contenido es uniforme. Un cambio muy pequeño en las propiedades del fluido a analizar conlleva a cambios en la respuesta del sensor.

A partir de los valores de frecuencia de los picos centrales de transmisión y de los valles que se generan a continuación de estos picos se calculó el valor del desplazamiento en frecuencia que se da debido al cambio de concentración. Los cambios calculados son relativos al valor de concentración inicial que en este caso es 0%. Los resultados de estos cálculos se encuentran en la tabla 11.

% V/V	c (m/s)	Δh (Hz)	ΔL (Hz)
0	1493,0	0	0
0,81	1498,4	3070	3270
1,62	1503,7	6460	7150
2,43	1509,1	11115	13020
3,25	1514,6	15895	20355
4,07	1520,0	19735	26865

Tabla 11: Desplazamiento en frecuencia de picos, Δh , y valles, ΔL , en la prueba de n-propanol realizada.

A partir de los datos de la tabla 11 se realizó una gráfica, figura 54, para observar si el comportamiento de estas soluciones sigue un patrón lineal.

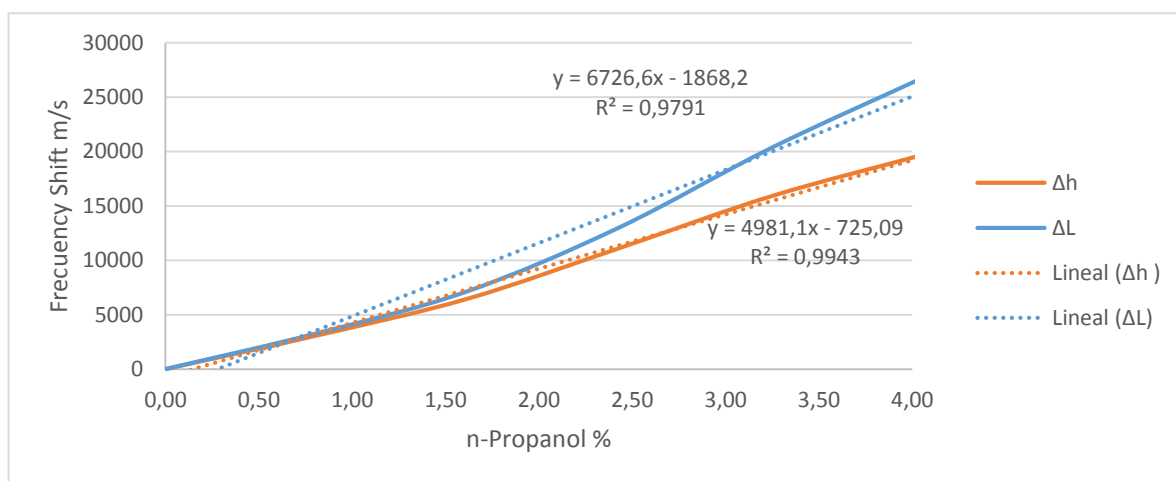


Figura 54: Linealidad resultados de pruebas de n-propanol en agua

Como se observa en la figura 54, tanto los picos como los valles de transmisión siguen un patrón lineal. En este caso los picos tienen un comportamiento más lineal que los valles, con un factor r^2 mayor al 99%, sin embargo los valles presentan un cambio mayor, 26865Hz contra 19735Hz.

En procesos técnicos la resolución mínima requerida para obtener resultados relevantes de pruebas en una muestra en específico es del 0.1%. La velocidad del sonido de las soluciones de n-Propanol en agua está alrededor de los 1500 m/s lo que indica que para obtener resultados relevantes se necesita una resolución de 1.5 m/s. (Hauptmann, Hoppe, & Puettmer, 2002)

Prueba Solución Salina

En la figura 55 se pueden observar los resultados de la prueba con diferentes concentraciones de solución salina. Los datos obtenidos por el sensor se presentan como líneas punteadas y los datos simulados por el software diseñado como líneas sólidas.

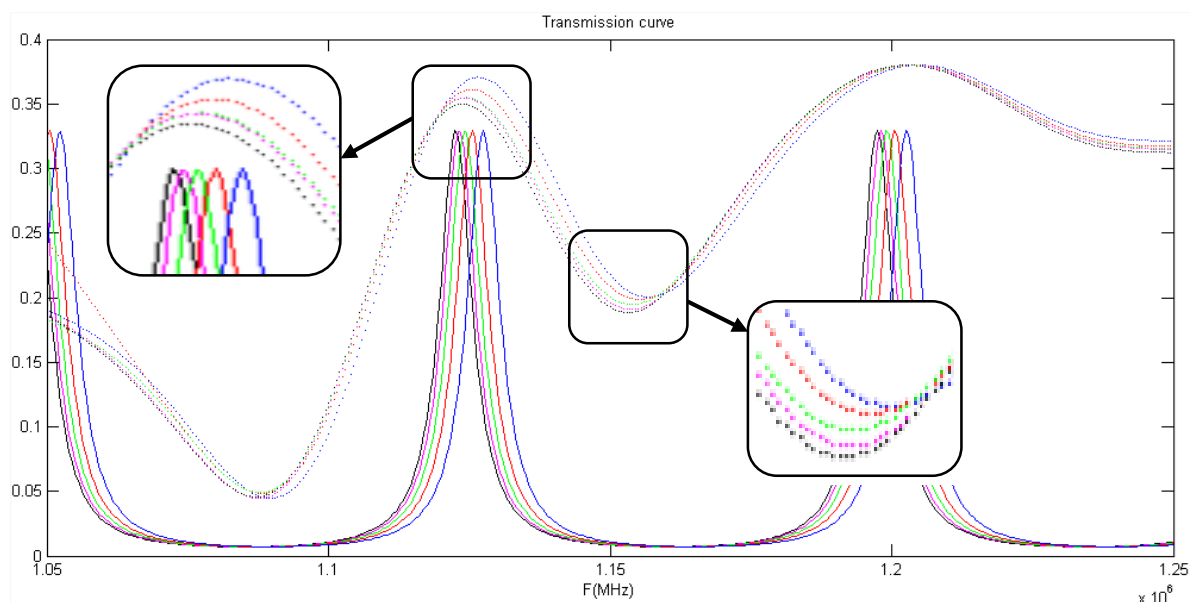


Figura 55: Resultados pruebas experimentales (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de NaCl en agua destilada

En la figura 55 se puede ver como los resultados de la simulación son muy cercanos a los resultados obtenidos por el sensor aunque se presenta una discrepancia mayor en cuanto al ancho de banda de las señales obtenidas, esto se debe quizás a que se presentó un valor mayor de atenuación en la prueba debido a las propiedades del líquido. Es necesario realizar un estudio experimental exhaustivo para cuantificar el valor de dicha atenuación.

En azul se presenta una solución salina isotónica al 0.9%, en rojo al 0.72%, en verde al 0.6%, en magenta al 0.51% y en negro una solución salina hipotónica al 0.45%.

El objetivo de esta segunda prueba es demostrar que el sistema cuenta con la sensibilidad necesaria para detectar cambios en las diferentes concentraciones de solución salina usadas y al mismo tiempo probar la funcionalidad del sensor al realizar análisis de muestras similares a las que se deben analizar en pruebas de laboratorio o pruebas cerca al paciente. Para esta prueba se fijó el rango de frecuencias alrededor del pico central de transmisión y se trabajó con un rango de frecuencias entre 1.05 y 1.25 MHz.

Para poder tener una mejor idea del comportamiento del sistema se realizó la misma transformada exponencial que se utilizó en las pruebas anteriores con n-Propanol y los resultados de esta transformada se presentan en la figura 56.

En esta prueba los resultados presentan una discrepancia mayor con las simulaciones que en la prueba con soluciones de n-Propanol, esto quizá debido a que en los datos encontrados para realizar la simulación no se tiene información detallada acerca de los valores de la velocidad del sonido en solución salina a baja concentración. Los datos se extrajeron realizando una interpolación lineal.

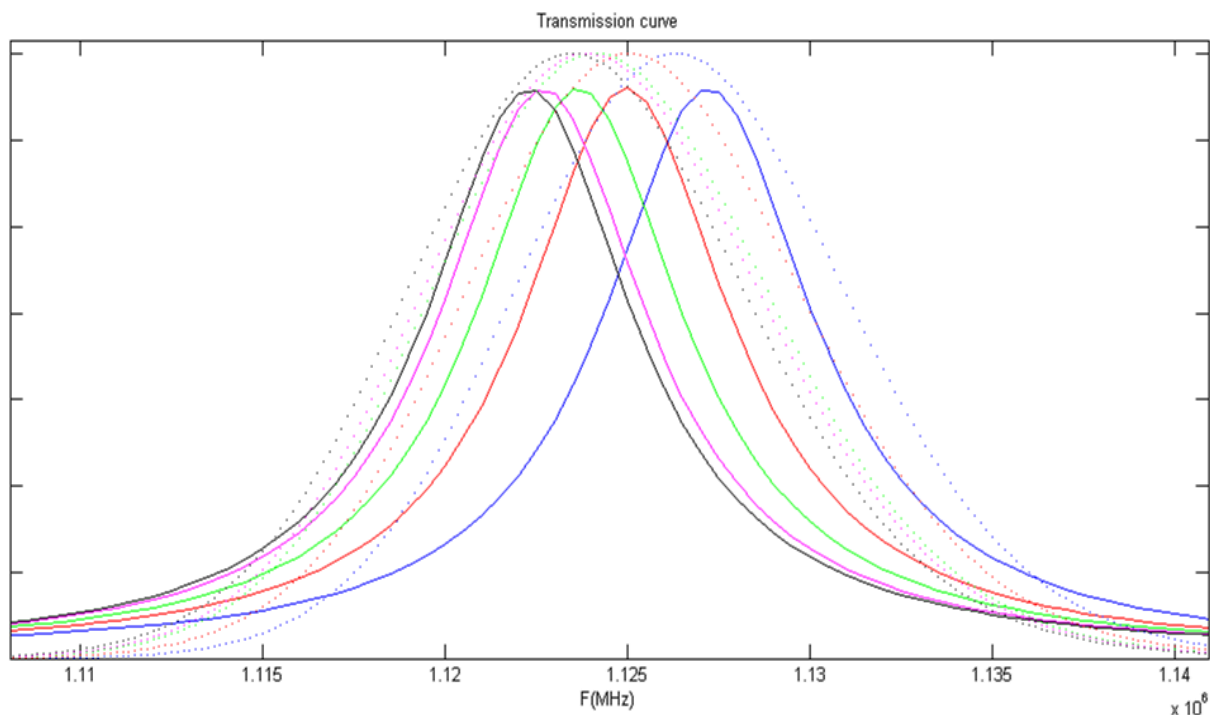


Figura 56: Resultados pruebas experimentales con transformación exponencial (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de NaCl en agua destilada

A partir de los valores de frecuencia de los picos centrales de transmisión y de los valles que se generan a continuación de estos picos se calculó el valor del desplazamiento en frecuencia que se da debido al cambio de concentración. Los cambios calculados son relativos al valor de concentración inicial que en este caso es 0.45%. Los resultados de estos cálculos se encuentran en la tabla 12.

% g/g	c m/s	Δh (Hz)	ΔL (Hz)
0,9	1495,8	2850	3470
0,72	1493,2	2435	3005
0,6	1491,5	2205	2825
0,51	1490,2	1225	1570
0,45	1489,3	0	0

Tabla 12: Desplazamiento en frecuencia de picos, Δh , y valles, ΔL , en la prueba de solución salina realizada.

Con los datos obtenidos de la tabla 12 se pasó a realizar una gráfica, figura 57, para ver qué tipo de comportamiento siguen los datos obtenidos.

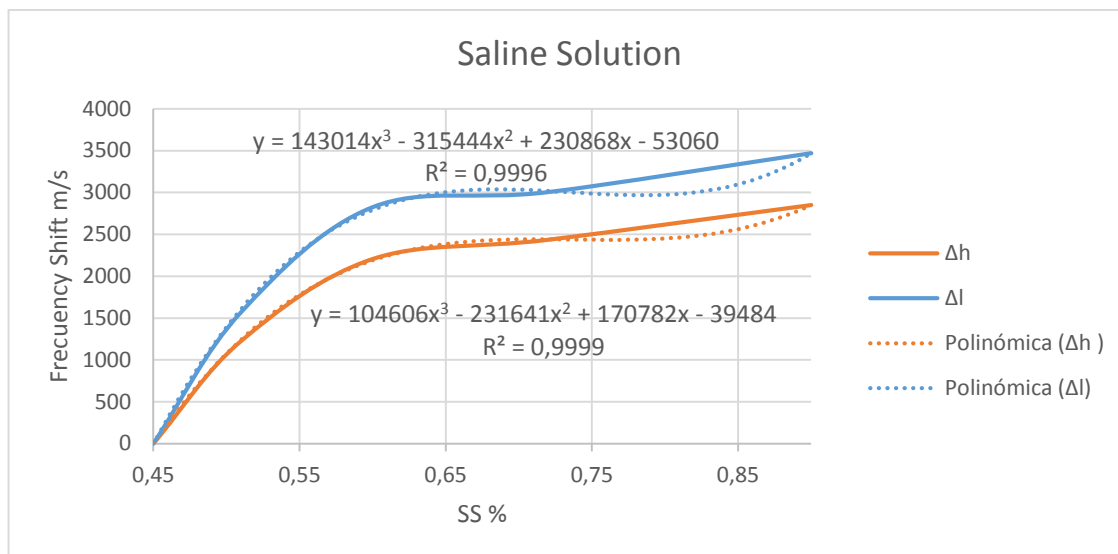


Figura 57: Comportamiento de los resultados de pruebas de NaCl en agua destilada

La figura 57 presenta la información de la variación en frecuencia que se induce al cambiar la concentración de solución salina de manera experimental. En esta gráfica se observa que las pruebas realizadas no siguen un comportamiento lineal y tienen un coeficiente de correlación mucho mayor con una regresión exponencial de orden 3. Esta es una de las razones por las cuales las simulaciones no son completamente acordes a los resultados ya que las simulaciones realizadas suponen cambios lineales en la velocidad del sonido lo que implica cambios lineales en el espectro de frecuencias.

En la figura 56 se puede observar cómo el sistema cuenta con la sensibilidad suficiente para detectar cambios de hasta 0.06% en la concentración de solución salina y permite realizar mediciones en sustancias con características similares a las de los fluidos biológicos y aquellas que se usan en las pruebas de laboratorio y en pruebas cerca al paciente.

Como se observa en la figura 57, tanto los picos como los valles de transmisión siguen un patrón polinómico de orden 3. Al igual que en la prueba anterior con n-Propanol, los picos tienen un comportamiento más cercano al compararlo con la regresión que los valles, con un factor r^2 mayor, sin embargo los valles presentan un cambio mayor en cuanto al desplazamiento total en el rango de frecuencias.

El comportamiento de ambos factores, tanto valles como picos pareciera tornarse lineal creciente a partir de 0,65% de concentración de solución salina lo que hace pensar que el comportamiento polinómico solo se presenta a muy bajas concentraciones.

Al poder diferenciar una solución salina al 0.45% de una al 0.51% se logró medir un cambio de tan sólo 60 miligramos de NaCl por kilogramo de solución.

Prueba n-Propanol vs Etanol

Para la prueba de n-Propanol vs Etanol se pasó de usar una estructura simple a una estructura más compleja que se compone de 7 capas y que contiene una cubeta de espectrofotometría como elemento descartable.

El objetivo de esta tercera prueba es observar el funcionamiento del sistema con un elemento descartable y al mismo tiempo comparar la respuesta de soluciones de igual concentración pero diferente soluto. Para esta prueba se fijó un rango de frecuencias más amplio que permitiera realizar una adecuada comparación entre las dos soluciones. El rango de frecuencias usado está comprendido entre 0.95 y 1.25 MHz.

En la figura 58 se pueden observar los resultados de la prueba de una solución al 5% de n-Propanol en agua destilada y una solución al 5% de etanol en agua destilada. La cantidad de analito usada fue de 2.5 ml.

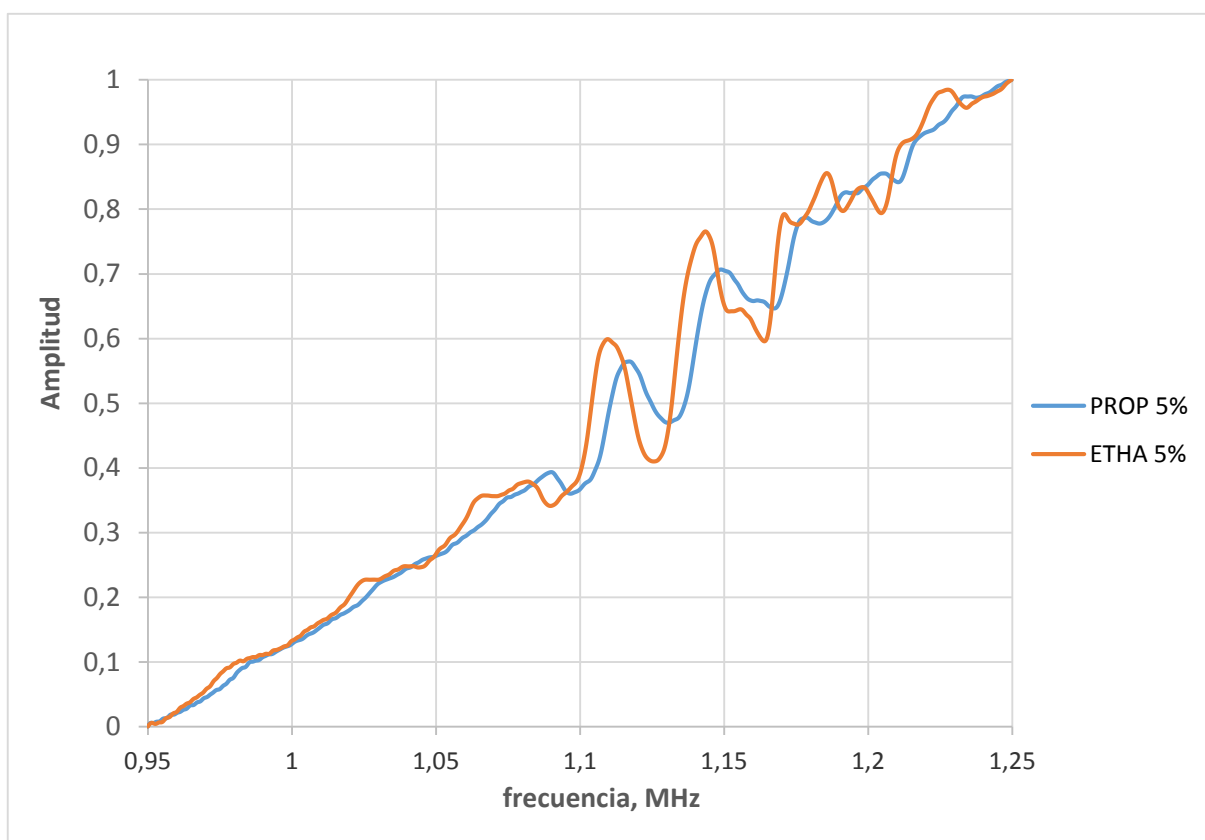


Figura 58: Prueba etanol vs n-propanol

En la figura 58 se puede ver como las señales obtenidas para ambas soluciones tienen dos picos de transmisión principales entre 1.1 y 1.15 MHz. La no aparición de más picos de transmisión se puede deber a que la respuesta de los transductores es máxima entre 1.1 y 1.15 MHz y atenúa los valores de amplitud que se encuentran por fuera de este rango.

Ambas señales se encuentran sobre una línea base creciente que posiblemente está relacionada con el cambio de fase que se da en este rango de frecuencias. Ambas señales presentan una línea base con características muy similares, ésta no tiene información relevante para encontrar diferencias entre ambas, por lo cual se decidió realizar una operación de eliminación de tendencia.

En la figura 59 se pueden observar los resultados del filtrado realizado. Adicionalmente se simuló el comportamiento de ambas soluciones con el software diseñado. Es importante tener en cuenta que la cubeta de espectrofotometría dista de tener unas dimensiones que se puedan aproximar adecuadamente a un modelo unidimensional. Como líneas punteadas se presentan los datos experimentales y como líneas sólidas los datos simulados.

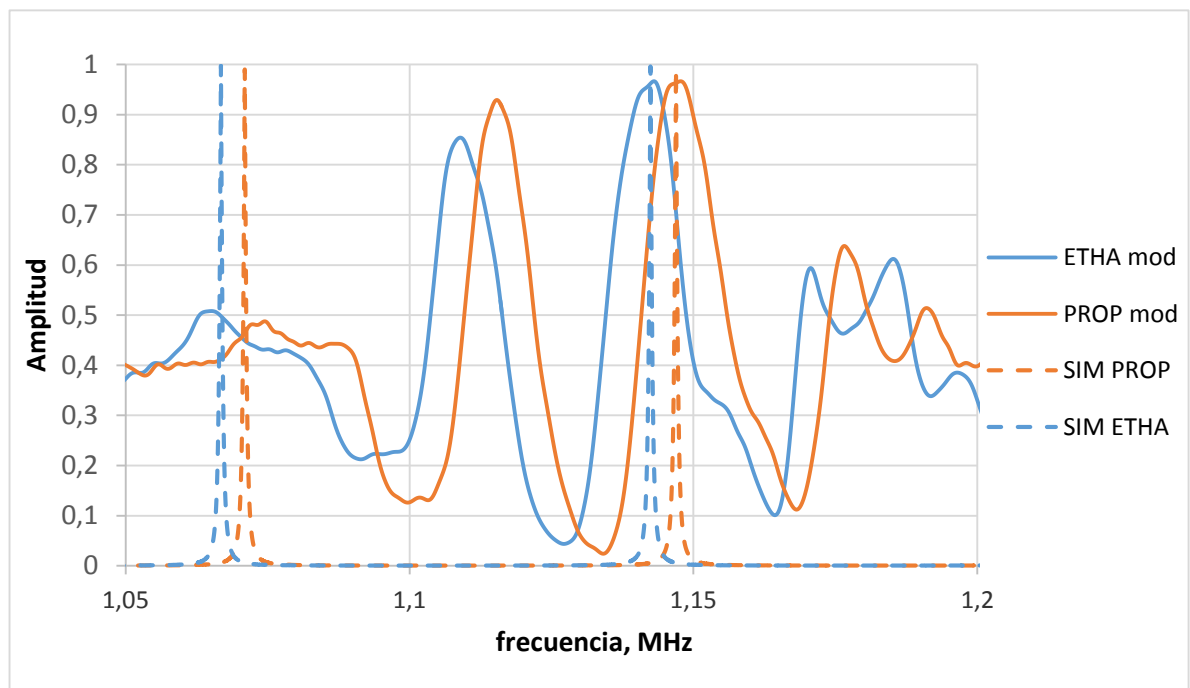


Figura 59: Resultados pruebas experimentales (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de soluciones de propanol (naranja) y etanol (azul) usadas

En la figura 59 se puede observar claramente cómo los resultados experimentales presentan una frecuencia de aparición de picos de resonancia mayor que las simulaciones. Esto puede suceder debido a que la simulación asume la estructura como unidimensional, en las pruebas anteriores debido a que la estructura era de mayor simplicidad y se asemejaba más a una estructura unidimensional no se presentaban discrepancias grandes pero en esta nueva estructura el elemento descartable por ejemplo presenta condiciones que podrían asemejarse más a un sistema de 2 dimensiones y para ser más precisos de 3 dimensiones por lo cual podrían aparecer nuevos modos de vibración debidos a esta multi-dimensionalidad.

A pesar de tener una respuesta un tanto diferente los picos principales de transmisión están alineados con los picos de la simulación lo cual mantiene la validez de la misma y permite usarla fielmente para analizar resultados en esta estructura.

En la tabla 13 se puede observar la sensibilidad de cada uno de los picos y valles principales de transmisión. Al igual que en las pruebas con la estructura más sencilla fue el valle posterior al primer pico de transmisión el que presentó mayor sensibilidad en la prueba. Con un desplazamiento total de 7500 Hz se obtiene que un cambio de 1.5 m/s en la velocidad del sonido de genera un desplazamiento de 1875 Hz, siendo esta la mejor respuesta hasta ahora del sistema.

	<i>f. Etanol (Hz)</i>	<i>f. n-propanol (Hz)</i>	Δf (Hz)
<i>Pico 1</i>	1109500	1116250	6750
<i>Valle 1</i>	1127750	1135250	7500
<i>Pico 2</i>	1142420	1146950	4530
<i>Valle 2</i>	1164500	1168500	4000

Tabla 13: Sensibilidad picos y valles de transmisión de la prueba de n-propanol vs etanol con soluciones al 5% de concentración.

Vale la pena mencionar que a diferencia de todos los resultados anteriores el segundo valle de esta prueba tiene una sensibilidad menor que el pico de transmisión que lo antecede, es posible que se deba a que la estructura no se asemeja totalmente a una estructura unidimensional o a problemas de alineación de la cubeta.

Prueba Leche Comercial

En la figura 60 se pueden observar los resultados de la prueba de productos lácteos comerciales. El color rojo representa la leche entera, el color azul la leche deslactosada y el color verde la leche de fresa. Para la realización de esta prueba se utilizó la estructura con la cubeta de espectrofotometría como elemento descartable. La cantidad de analito usada fue de 2.5 ml. A los datos experimentales presentados se les realizó la transformada exponencial usada en puntos anteriores para mejorar la visualización de los resultados.

En la figura 60 se pueden observar los datos obtenidos por el sensor como líneas punteadas y los datos simulados por el software diseñado como líneas sólidas

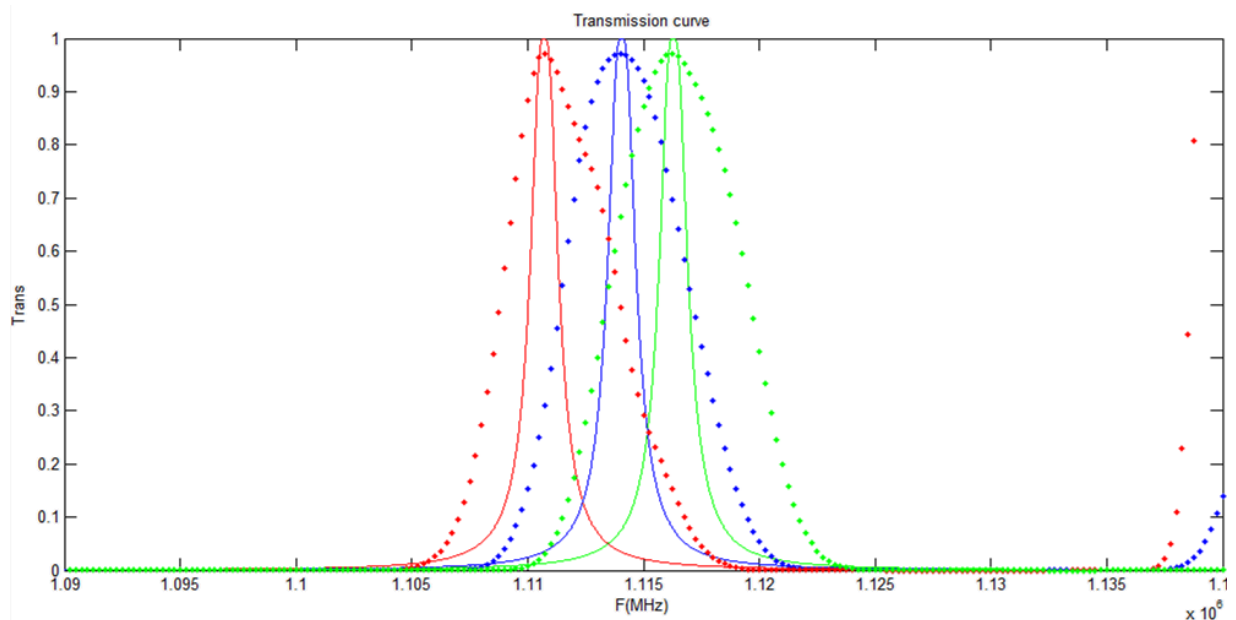


Figura 60: Resultados pruebas experimentales (líneas punteadas) vs simulaciones (líneas sólidas) de diferentes tipos de productos lácteos comerciales usados

El objetivo de esta prueba es observar el funcionamiento del sistema con sustancias de las que se desconocen sus propiedades y el potencial de la herramienta de simulación para detectar el cambio en la velocidad del sonido realizando un procedimiento de ingeniería inversa para determinar el cambio en la velocidad longitudinal del sonido que provocaría un desplazamiento igual al presentado por las sustancias analizadas en el espectro de frecuencias. Para esta prueba se fijó un rango de frecuencias más estrecho que permitiera visualizar de manera correcta los picos de interés. El rango de frecuencias usado está comprendido entre 1.09 y 1.1 MHz.

En la figura 59 se puede observar que hubo un cambio significativo al realizar la prueba con los diferentes productos lácteos analizados. La leche entera presenta una velocidad longitudinal del sonido menor que las dos variaciones analizadas.

El cambio estimado calculado entre la leche entera y la deslactosada es de 4.5 m/s y entre la leche entera y la leche de fresa es de 7.5 m/s.

7.4 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Asumiendo que el valor de r^2 es suficientemente alto en las pruebas de n-Propanol para considerar el sistema como lineal dentro de un rango de concentraciones de 0 a 4% y tomando los valores límite como referencia, se obtiene que un cambio de 1.5m/s en la velocidad del sonido de la solución genera un desplazamiento de 1096 Hz en los picos de transmisión y de 1493 Hz en los valles.

Los resultados obtenidos en esta prueba indican que el montaje usado se puede considerar apto para realizar mediciones de concentración relativa de n-Propanol en agua destilada entre 0 y 4% de concentración y que el parámetro a medir es el desplazamiento de los valles de transmisión que prosiguen a los máximos de transmisión alrededor de 1.13 MHz. La ecuación que permite determinar el cambio de concentración que se presenta es:

$$\Delta C = \frac{\Delta f + 1868.2}{6726.6}$$

Es claro como el comportamiento de los picos centrales de transmisión es acorde a la simulación en todas las pruebas realizadas. En cuanto se da un cambio en la velocidad longitudinal del sonido de la muestra analizada se genera un desplazamiento en el espectro de frecuencias que pudo ser simulado en todas las pruebas realizadas.

Es recomendable realizar una caracterización detallada de los fluidos a analizar para así poder tener datos más acertados y poder realizar simulaciones con mayor certeza de los resultados.

Los resultados obtenidos en la prueba de solución salina indican que el montaje usado se puede considerar apto para realizar mediciones de concentración relativa de solución salina entre 0.45 y 0.9% de concentración y que el parámetro a medir es el desplazamiento de los valles de transmisión que prosiguen a los máximos de transmisión alrededor de 1.125 MHz.

Al realizar un proceso de ingeniería inversa en el que se simuló una estructura con un líquido contenido con propiedades similares a las del agua y se comenzó a variar la velocidad del sonido hasta obtener un pico de resonancia en la frecuencia en la cual se encuentra el máximo de transmisión de las pruebas experimentales con productos lácteos se pudo obtener el cambio de la velocidad longitudinal del sonido de las diferentes sustancias.

En la industria alimenticia es sumamente importante que los productos que se comercializan tengan siempre las mismas propiedades y los procesos de producción así como la materia prima que se usa influyen en esta estabilidad. Con pruebas simples como la que se realizó con los tres productos lácteos se puede encontrar la respuesta de una mezcla óptima o de una materia prima ideal y luego evaluar cada una de las mezclas que se van obteniendo o de las materias primas que se reciben para saber si se cuenta con procesos aceptados o materia prima de buena calidad y así asegurar la estabilidad de las propiedades de los productos.

La melamina es una molécula orgánica rica en nitrógeno y es usada para adulterar productos lácteos haciendo parecer que el contenido de proteína es mayor del que realmente es. Los sensores usados normalmente para verificar la calidad de la leche se basan en marcadores de nitrógeno como medida indirecta de la cantidad de proteína contenida. Productos adulterados con melamina producen efectos nocivos en la salud como falla renal y recientemente en china 300000 bebés sufrieron síntomas por haber ingerido leche adulterada de los cuales 6 murieron. En estudios realizados sobre la cantidad de melamina contenida en leche adulterada se encontró que había productos con hasta 2.5

gramos de melamina por kilogramo de leche lo cual equivale a un cambio en la velocidad del sonido de la leche de alrededor de 5 m/s. (Elvira, Rodriguez, & Lynnworth, 2009)

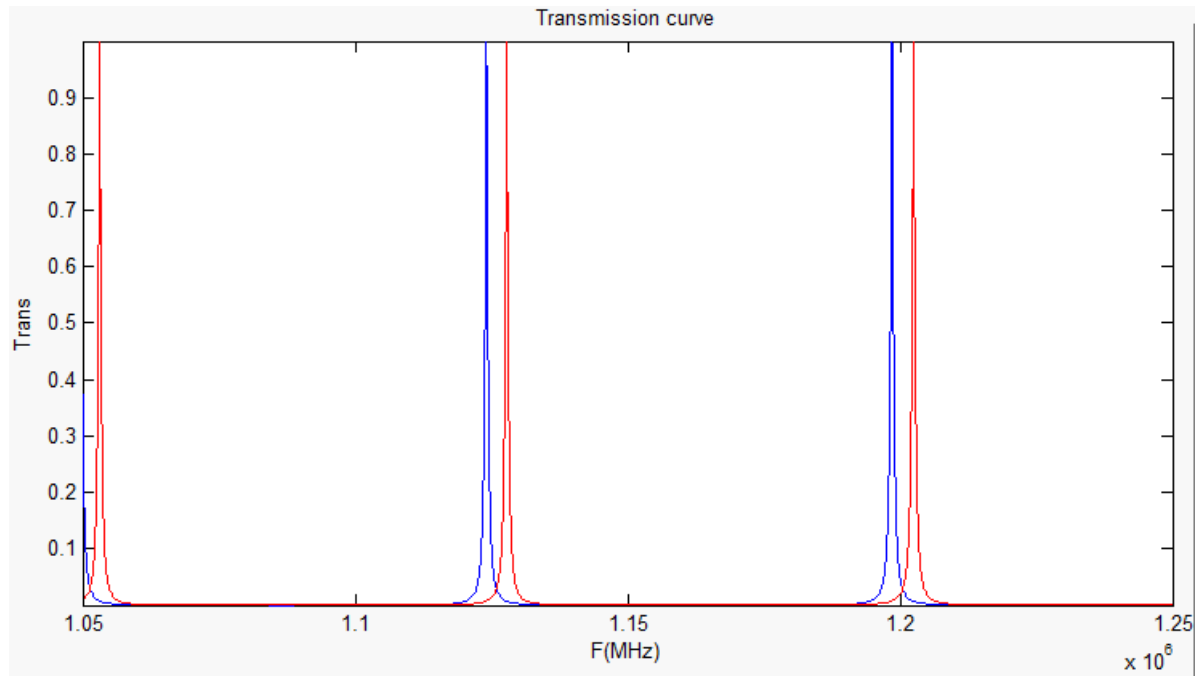


Figura 61: Simulación leche adulterada con melamina

En la figura 61 se muestra el desplazamiento en frecuencia de la respuesta de leche sin adulterar, azul, y leche adulterada con melamina, rojo. En la simulación se puede ver como el sensor desarrollado podría ser suficientemente sensible a cambios como los que presentó la leche adulterada en China. Un sensor como el presentado en este trabajo podría ser usado como un método de control de calidad de productos sensibles a la adulteración con melamina.

La monitorización de cultivos biológicos es sumamente importante en la biotecnología y permite no sólo ayudar a comprender mejor el metabolismo de diferentes microorganismos y su reacción ante diferentes medios de cultivo sino para la detección de microorganismos patógenos en medios de cultivo selectivos en la industria alimenticia, pruebas de calidad de agua y pruebas en fluidos corporales. Estudios recientes muestran que existe una relación lineal entre el número de bacterias en un cultivo y la velocidad del sonido y que durante un proceso de fermentación puede haber cambios en la velocidad del sonido de un par de metros por segundo. Un sensor basado en cristales fonónicos de cavidad resonante como el desarrollado en este trabajo podría usarse para realizar la monitorización de cultivos aunque todavía deben realizarse estudios para determinar qué tan sensible debe ser el sistema para ser usado en las diferentes aplicaciones que se requiera monitorizar un cultivo (Resa, Bolumar, Elvira, Pérez, & Montero de Espinosa, 2007).

Una de los análisis más importantes que se realizan en la industria automotriz es el análisis de la calidad del combustible. Un nivel adecuado de octanaje de la gasolina es crucial para

el correcto funcionamiento de los motores y está definido por la composición misma de la gasolina. En investigaciones recientes el índice de octano (RON) fue medido con un sistema basado en cristales fonónicos y se determinó que este tipo de sensores no solo permiten realizar la medición del octanaje sino que proveen una plataforma robusta de medición in situ con un gasto mínimo de combustible que podría ser implementada para análisis en la industria automotriz (Oseev, Zubstov, & Lucklum, 2013).

Producto de este trabajo se presentó un manuscrito del artículo titulado “Cavity Resonance Biomedical Sensor” a la “ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition”. Este artículo ya fue aprobado para ser presentado oralmente y luego de la presentación será incluido en las memorias del evento.

De igual manera se presentó un manuscrito titulado “Phononic crystal sensor for medical applications” a presentarse en la “IEEE Sensors 2014” en Valencia para la “Special Session on Photonic and Phononic Crystal Sensors”. Este artículo también fue aprobado para presentación oral y luego de la presentación será incluido en las memorias del evento.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Amo, F., Loïc, A., & Martinez Normand, F. (2005). *Introducción a la ingeniería del software*. Delta Publicaciones.
- Arnau, A. (2008). *Piezoelectric Transducers and Applications* (2 ed.). Berlin: Springer.
- Blitz, J., & Simpson, G. (1996). *Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing* (1 ed.). Springer.
- Bronzino, J. D. (2000). *The Biomedical Engineering Handbook* (Vol. 1). Boca Ratón: CRC PRESS IEEE PRESS.
- Carovac, A., Smajlovic, F., & Januzovic, D. (2011). Application of Ultrasound in Medicine. *ACTA INFORMATICA MEDICA*, 168-171.
- Casis, E., & Bedini, J. (2002). *Bases para la discusión en la implantación del Point of Care Testing (POCT)*. Madrid: Sociedad Española de Dirección y Gestión de los Laboratorios Clínicos (SEDIGLAC).
- Cote, G. L., Lec, R. M., & Pishko, M. V. (2003). Emerging biomedical sensing technologies and their applications. *Sensors Journal IEEE*, 251-266.
- Crocker, M. J. (1998). *Handbook of Acoustics*. John Wiley & Sons.
- Elvira, L., Rodriguez, J., & Lynnworth, L. C. (2009). Sound speed and density characterization of milk adulterated with melamine. *JASA Express Letters*. doi:10.1121/1.3104625
- Ferrari, V., & Lucklum, R. (2008). Overview of Acoustic - Wave Microsensors. En A. Arnau, *Piezoelectric Transducers and Applications* (págs. 40-62). Springer.
- Gubala, V., Harris, L. F., Ricco, A. J., Tan, M. X., & Williams, D. E. (2011). Point of Care Diagnostics: Status and Future. *analytical chemistry*.
- Hauptmann, P., Hoppe, N., & Puettmer, A. (2002). Application of ultrasonic sensors in the process industry. *Meas. Sci. Technol.* 13, 73-83.
- Hsu, J.-C. (2013). Effects of elastic anisotropy in phononic band-gap plates with two-dimensional lattices. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46 , 113-121.
- Hugh D. Young, R. A. (2009). *Física universitaria con física moderna*. Pearson Educación.
- Kankare, J., Loikas, K., & Salomaki, M. (2006). Method for Measuring the Losses and Loading of a Quartz Crystal Microbalance. *Analytical Chemistry*, 1875-1882.
- Kushwaha, M. S., Halevi, P., Martinez, G., Dobrzynski, L., & Djafari-Rouhani, B. (1993). Acoustic Band Structure of Periodic Elastic Composites. *Phys. Rev. Lett.*, 2022.

- Lucklum, R., & Hauer, I. (2009). Transmission properties of a 1D resonant cavity. *EFTF-IEEE IFCS Proceedings*, 248-253.
- Lucklum, R., & Li, J. (2009). Phononic crystals for liquid sensor applications. *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 20-32.
- Lucklum, R., Behling, C., Cernosek, R., & Martin, S. (1997). Determination of complex shear modulus with thickness shear mode resonators. *Journal of Applied Physics*, 346-356.
- Lucklum, R., Ke, M., & Zubtsov, M. (2012). Two-dimensional phononic crystal sensor based on a cavity mode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 271-277.
- Lucklum, R., Li, J., & Zubstov, M. (2010). 1D and 2D Phononic Crystal Sensors. *Procedia Engineering* 5, 436-439.
- Lucklum, R., Soares, D., & Kanazawa, K. (2008). Models for Resonant Sensors. En A. Arnau, *Piezoelectric Transducers and Applications* (págs. 64-96). Springer.
- Lucklum, R., Zubtsov, M., Ke, M., Oseev, A., Grundmann, R., Henning, B., & Hempel, U. (2012). 2D phononic crystal sensor with normal incidence of sound. *Sensors and Actuators A* 186, 118-124.
- Millner, R. (1987). *Wissensspeicher Ultraschalltechnik*. Fachbuchverl.
- Montagut, Y., Narbon, J. G., Jimenez, Y., March, C., Montoya, A., & Arnau, A. (2011). QCM Technology in Biosensors. En P. A. Serra, *Biosensors - Emerging Materials and Applications* (págs. 153-178). España. Obtenido de <http://www.intechopen.com/books/biosensors-emerging-materials-and-applications/qcm-technology-in-biosensors>
- Nair, R. V., & Vijaya, R. (2010). Photonic crystal sensors: An overview. *Progress in Quantum Electronics*, 89-134.
- Oseev, A., Zubstov, M., & Lucklum, R. (2013). Gasoline properties determination with phononic crystal cavity sensor. *Sensors and Actuators B* 189, 208 - 212.
- Pain, H. J. (2005). *The Physics of Vibrations and Waves*. John Wiley & Sons.
- Qiu, C., Liu, Z., Mei, J., & Ke, M. (2005). The layer multiple-scattering method for calculating transmission coefficient of 2D phononic crystals. *Solid State Comm.* 134, 765 - 770.
- Resa, P., Bolumar, T., Elvira, L., Pérez, G., & Montero de Espinosa, F. (2007). Monitoring of lactic acid fermentation in culture broth using ultrasonic velocity. *Journal of Food Engineering* 78, 1083 - 1091.
- Schaaffs, W. (1967). *Molekularakustic*. Heidelberg: Springer.

- Sigalas, M. M., & Economou, E. N. (1992). Elastic and acoustic wave band structure. *J. Sound Vibr.* 158, 377-382.
- Skinner, J. S. (2013). *The Costly Paradox of Health-Care Technology*. Obtenido de MIT technology Review: <http://www.technologyreview.com/news/518876/the-costly-paradox-of-health-care-technology/>
- Sommerville, I. (2005). *Ingeniería del software*. Pearson Education.
- Thomas, E. L. (2009). Applied physics: Bubbly but quiet. *Nature* 462, 990-991.
- Ulrich, k., & Eppinger, S. (2009). *Diseño y Desarrollo de Productos. Gestión de la Innovación* (Cuarta ed.). Mc Graw Hill.
- World Health Organization. (2014). *Diagnostics and Laboratory Technology*. Obtenido de Contributions to Millennium Development Goals: http://www.who.int/diagnostics_laboratory/3by5/en/
- Y. Tanaka, Y. T. (2000). Band structures of acoustic waves in phononic lattices: two-dimensional composites with large acoustic mismatch. *Phys. Rev. B* 62, 7387 - 7392.